

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## DIELEKTRICKÁ ABSORPCE ELEKTROIZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

DIELECTRIC ABSORPTION OF ELECTROINSULATING MATERIALS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Branislav Pavlinský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Luděk Pelikán

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Branislav Pavlinský

**ID:** 203316

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Dielektrická absorpce elektroizolačních materiálů**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Vypracujte teoretický rozbor o možnostech nedestruktivní diagnostiky vysokonapěťových zařízení.
2. Důkladně popište proces dielektrické absorpce.
3. Zaměřte se na diagnostiku izolace pomocí měření dielektrické absorpce.
4. Prozkoumejte její možnosti využití u zařízení s polymerní izolací.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Luděk Pelikán

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá základnými fyzikálnymi princípmi dielektrík, rovnako ako aj popísanie javu dielektrickej absorpcie. V práci sú uvedené diagnostické metódy, ktoré využívajú tento jav, na základe dejov odohrávajúcich sa v dielektriku po pripojení jednosmerného napätia. Ďalej sa práca zaoberá diagnostickými metódami pre zistenie stavu izolácie rôznych vysokonapäťových elektrických zariadení. Práca pojednáva aj o vlastnostiach a parametroch elektroizolačných materiálov - konkrétne polymérov. Tieto parametre získavame použitím zmienených diagnostických metód. Znalosťou týchto parametrov dosiahneme dostatok informácií o izolácií, na určenie jej stavu a predišli možným škodám.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

dielektrická absorpcia, izolačný odpor, diagnostické metódy, rezistivita, dielektrikum, stratový činiteľ, izolácia, polarizačný index, dielektrické straty, polarizácia dielektrika, elektrická vodivosť, polyméry

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the basic physical principles of dielectrics as well as the description of the phenomenon of dielectric absorption. The work presents diagnostic methods that use this phenomenon, based on the events taking place in the dielectric after the connection of DC voltage. Furthermore, the work deals with diagnostic methods for determining the state of insulation of various high-voltage electrical equipment. The work also deals with the properties and parameters of electrical insulating materials - specifically polymers. We obtain these parameters using the mentioned diagnostic methods. By knowing these parameters, we achieve enough information about the insulation to determine its condition and prevent possible damage.

## KEYWORDS

dielectric absorption, insulation resistance, diagnostic methods, resistivity, dielectric, loss factor, insulation, polarization index, dielectric losses, dielectric polarization, electrical conductivity, polymers

PAVLINSKÝ, Branislav. *Dielektrická absorpcia elektroizolačných materiálov*. Brno, 2020, 63 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Luděk Pelikán

## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Dielektrická absorpcia elektroizolačných materiálov“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno 10.06.2020

.....  
podpis autora

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánu Ing.Luděkovi Pelikánovi, za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno      10.06.2020

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Dielektrikum a izolant</b>	<b>11</b>
1.1 Rozdelenie dielektrík . . . . .	11
1.2 Vlastnosti dielektrík . . . . .	12
1.3 Polarizácia dielektrika . . . . .	12
1.3.1 Deformačná polarizácia (Pružná) . . . . .	13
1.3.2 Relaxačná polarizácia . . . . .	14
1.3.3 Migračná polarizácia . . . . .	15
1.4 Elektrická vodivosť dielektrík . . . . .	18
1.4.1 Elektrická vodivosť plyných izolantov . . . . .	19
1.4.2 Elektrická vodivosť kvapalných izolantov . . . . .	19
1.4.3 Elektrická vodivosť pevných izolantov . . . . .	20
1.5 Dielektrické straty . . . . .	22
1.5.1 Dielektrické straty v plyných izolantoch . . . . .	24
1.5.2 Dielektrické straty v kvapalných izolantoch . . . . .	25
1.5.3 Dielektrické straty v pevných izolantoch . . . . .	25
1.6 Elektrická pevnosť . . . . .	26
1.6.1 Elektrická pevnosť plyných izolantov . . . . .	26
1.6.2 Elektrická pevnosť kvapalných izolantov . . . . .	27
1.6.3 Elektrická pevnosť pevných izolantov . . . . .	27
<b>2 Dielektrická absorpcia</b>	<b>30</b>
<b>3 Diagnostika pomocou merania dielektrickej absorpcie</b>	<b>33</b>
3.1 Hľadané parametre . . . . .	33
3.1.1 Izolačný odpor . . . . .	33
3.1.2 Objemová rezistivita . . . . .	33
3.1.3 Povrchová rezistivita . . . . .	33
3.1.4 Povrchový odpor . . . . .	33
3.1.5 Objemový odpor . . . . .	34
3.1.6 Polarizačný index . . . . .	34
3.1.7 Koeficient dielektrické absorpcie . . . . .	35
3.1.8 Permittivita . . . . .	36
3.2 Diagnostické metódy . . . . .	37
3.2.1 Volt-ampérová metóda . . . . .	37
3.2.2 Metóda Wheatstonova mostíku . . . . .	38

3.2.3	Kompenzačná metóda . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Polyméry</b>	<b>40</b>
4.1	Termoplasty . . . . .	41
4.1.1	Polyetylén (PE) . . . . .	41
4.1.2	Polyimidy (PI) . . . . .	41
4.1.3	Polyamidy (PA) . . . . .	41
4.1.4	Polyvinylchlorid (PVC) . . . . .	42
4.2	Reaktoplasty . . . . .	42
4.2.1	Fenoplasty (PF) . . . . .	42
4.2.2	Aminoplasty . . . . .	42
4.2.3	Epoxidy (EP) . . . . .	43
4.2.4	Silikóny . . . . .	43
4.3	Elastomery . . . . .	43
4.3.1	Butadien-styrenový kaučuk . . . . .	43
4.3.2	Silikónové kaučuky . . . . .	43
4.4	Možnosti merania pomocou DAR . . . . .	44
4.4.1	Prenosné zariadenia . . . . .	44
4.4.2	Laboratórne zariadenie . . . . .	45
4.4.3	Bunka pre meranie pevných dielektrík Tettex 2914 . . . . .	46
4.4.4	Bunka pre meranie kvapalných dielektrík Tettex 2903 . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Diagnosticke metody vysokonapätovych zariadení</b>	<b>48</b>
5.1	Transformátory . . . . .	48
5.1.1	Analýza nabíjajúcich a vybíjajúcich prúdov . . . . .	48
5.1.2	Meranie izolačného odporu . . . . .	49
5.1.3	Meranie kapacity a stratového činiteľa izolácie . . . . .	50
5.1.4	Meranie kriviek zotaveného a samovybíjacieho napätia . . . . .	52
5.2	Motory . . . . .	53
5.2.1	Meranie povrchových a izolačných odporov vn statorových cie- vok . . . . .	53
5.2.2	Meranie izolačného odporu vinutia statoru a rotor . . . . .	54
5.2.3	Meranie kapacity a stratového činiteľa izolácie . . . . .	55
5.3	Zvodiče prepätia . . . . .	56
5.3.1	Napätovo-prúdová charakteristika . . . . .	56
5.3.2	Meranie referenčného napätia a referenčného prúdu . . . . .	56
5.3.3	Meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát . . . . .	57
5.4	Káble . . . . .	57
5.4.1	Meranie stratového činiteľa a permitivity . . . . .	57



5.4.2	Meranie do prierazu . . . . .	58
5.4.3	Meranie výdržným napätím . . . . .	58
5.4.4	Meranie čiastočných výbojov . . . . .	59
<b>Záver</b>		<b>60</b>
<b>Literatúra</b>		<b>61</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Rozdelenie dielektrik . . . . .	11
1.2	Ukážka elektrónovej polarizácie . . . . .	13
1.3	Ukážka iónovej polarizácie . . . . .	14
1.4	Ukážka relaxačnej polarizácie . . . . .	14
1.5	Pred priložením elektrického poľa . . . . .	16
1.6	Po priložení elektrického poľa . . . . .	16
1.7	Vznik hetero-náboja v blízkosti katódy . . . . .	17
1.8	Vznik homo-náboja v blízkosti katódy . . . . .	17
1.9	Sériové (vľavo) a paralelne zapojenie (v pravo) . . . . .	23
2.1	Priebeh nabíjania a vybíjania kondenzátora v čase . . . . .	30
3.1	Rozdiely izolačného odporu suchého a vlhkého izolantu v závislosti na čase . . . . .	34
3.2	Zapojenie pre meranie vnútorného odporu . . . . .	37
3.3	Zapojenie pre meranie povrchového odporu . . . . .	37
3.4	Zapojenie pre meranie izolačného odporu . . . . .	37
3.5	Zapojenie Wheatstonova mostíku na meranie vnútorného odporu . . .	38
3.6	Zapojenie pri meraní kompenzačnej metódy . . . . .	39
4.1	Rozdelenie polymérov . . . . .	40
4.2	Typické hodnoty elektrických vlastností polymérov . . . . .	40
4.3	Prenosné meracie zariadenia . . . . .	45
4.4	Laboratórne zariadenie Tettex 2830/2831 . . . . .	46
4.5	Bunka pre meranie pevných dielektrík Tettex 2914 . . . . .	46
4.6	Bunka pre meranie kvapalných dielektrík Tettex 2903 . . . . .	47
5.1	Časový priebeh nabíjacieho a vybíjacieho prúdu . . . . .	49
5.2	Faktory charakterizujúce pomer meraných veličín . . . . .	51
5.3	Priebeh stratového činiteľa v závislosti od napätia . . . . .	51
5.4	Priebeh zotaveného napätia v závislosti na čase . . . . .	52
5.5	Priebeh samovybíjacieho napätia v závislosti na čase . . . . .	53
5.6	Meranie izolačného odporu statora . . . . .	54
5.7	Meranie izolačného odporu rotora . . . . .	55
5.8	Scheringův mostík . . . . .	57

# Úvod

Izolačný systém v elektrotechnike je systém, ktorý sa skladá z materiálov a prvkov. Každý izolačný systém musí spĺňať kritéria na spoľahlivosť, bezpečnosť a funkciu, na ktorú sú určené. Tieto kritéria ovplyvňujú okolité podmienky a vplyvy na dané izolačné materiály. Aby izolačné materiály vydržali čo najdlhšie v bezporuchovom stave je nutné uplatniť určité diagnostické metódy, ktoré sa zaoberajú zistením parametrov izolačných materiálov. Na základe týchto parametrov je potom možné zistiť stav meraného izolačného materiálu.

Jedna z možností diagnostiky je meranie dielektrickej absorpcie pomocou aplikácie jednosmerného napätia na izolačný materiál. Dielektrická absorpcia sa dá využiť na diagnostiku stavu izolácie elektrických vedení a elektrických strojov ako sú výkonné transformátory či motory. Takáto diagnostika je nedeštruktívna, neinvazívna a veľmi ekonomická. Keďže intervaly údržby alebo výmeny elektrických strojov sú stanovené na základe štatistík, u ktorých sa nedá s určitosťou predpokladať s okolitými vplyvmi akými sú napríklad zataženia. Kvôli tomu sú stroje často vymieňané predčasne alebo až po poruchách, čo spôsobuje finančné straty. Takýmto stavom je možné predísť diagnostikou dielektrík, akou je napríklad meranie dielektrickej absorpcie. Ďalšie možnosti diagnostiky pre vysokonapäťové zariadenia sú uvedené v tejto práci, tak isto aj daná teória k tejto problematike.

Úvod práce je venovaný teoretickému rozboru dielektrík a ich chovanie v elektrickom poli. Následne je vysvetlený dej dielektrickej absorpcie. Ďalšia kapitola hovorí o potrebných parametroch dielektrík, ktoré sú nevyhnutné pre určenie stavu danej izolácie a o možných spôsoboch pre ich meranie. Tieto merania vychádzajú z teórie dielektrickej absorpcie. Pokračovanie práce tvoria polyméry, kde sme si vypísali základné používané polymérne izolanty a možnosti ich merania, pomocou zariadení pre meranie dielektrickej absorpcie. Záver práce tvoria ďalšie diagnostické metódy rôznych vysokonapäťových zariadení, ktoré nám dokážu dať rovnako výpovednú hodnotu o stave izolácie ako aj pri meraní dielektrickej absorpcie.

# 1 Dielektrikum a izolant

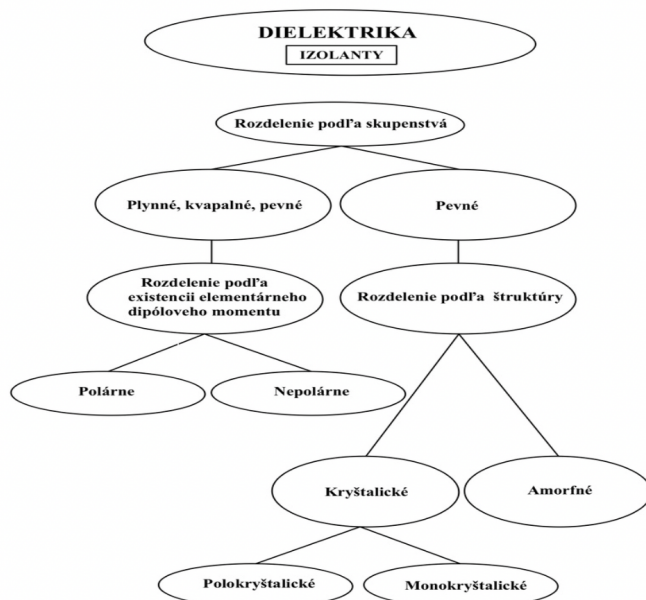
Dielektrikum je látka, ktorá má schopnosť polarizácie, pretože ak ju vložíme do elektrického poľa, tak začne tvorba vlastného vnútorného elektrického poľa. Všeobecne sa dielektrikum vyznačuje malou mernou elektrickou vodivosťou. Hlavným parametrom dielektrika je jeho relatívna permitivita  $\varepsilon_r$ . Dielektrika sa využívajú k hromadeniu elektrickej energie a predstavujú širší pojem než izolant. Príklady dielektrík: sluda, vzduch, papier, keramika, plasty, minerálne oleje a pod. Ak dielektrikum neobsahuje voľné nosiče náboja, označujeme ho ako izolant. [3, 5]

Izolant je látka, ktorá bráni prechodu prúdu medzi dvomi miestami s rozdielnym elektrickým potenciálom. Izolant môžeme označiť ako dielektrikum s vysokou rezistivitou. Hlavnou vlastnosťou izolantu je schopnosť klásť odpor elektrickému prúdu. Hlavným parametrom izolantu je rezistivita  $\rho$ . Ideálnym izolantom je iba vákuum. Príklady izolantov: plasty, keramika, vzduch, SF<sub>6</sub>, minerálne oleje. [3]

Z uvedeného vyplýva, že každý izolant je dielektrikum, no nie každé dielektrikum je izolant, viď obr.1.1

## 1.1 Rozdelenie dielektrík

Dielektriká delíme podľa skupenstva, štruktúry a podľa existencie elementárneho dipólového momentu, ako je vidieť na obr.1.1



Obr. 1.1: Rozdelenie dielektrík (Prevzaté a upravené z [1])

## 1.2 Vlastnosti dielektrík

Nasledujúce parametre ovplyvňujú dielektrické a izolačné vlastnosti elektro izolačných materiálov a závisia na vnútorných vplyvoch, ktoré pôsobia na dané dielektrikum: čas, frekvencia, teplota, vlhkosť, intenzita elektrického poľa, napätie, expozícia a materiál elektród. [6]

- Čas – ako sme uvideli v 1.3.2 relaxačné polarizácie sú časovo závislé a každá má svoj čas  $\tau$ . V technickej praxi sa meranie dielektrických vlastností skúša po dobu 1 minúty.
- Frekvencia – kvôli tomu že permitivita a koeficient dielektrických strát nie sú konštantné v rozsiahlom frekvenčnom rozsahu, musíme merať pri frekvencii pri ktorej bude materiál používaný.
- Teplota – pôsobením vysokými teplotami na dielektrikum sa menia jeho elektrické vlastnosti.
- Vlhkosť – ovplyvňuje všetky dielektrické a odporové vlastnosti, preto sa musí kontrolovať pred a počas skúšky.
- Intenzita elektrického poľa – iba v prípade medzi vrstvovej polarizácie stúpa intenzita elektrického poľa, obecné koeficient dielektrických strát a permitivita sa menia iba veľmi málo na základe intenzity elektrického poľa, kde sa neobjavujú ionizačné javy.
- Napätie – so zvyšovaním napätia alebo intenzity elektrického poľa sa môžu objaviť nelineárne javy. Časové závislé nabíjacie prúdy sú závislé na napätí.
- Expozícia – preferované prostredie pre expozíciu pred a behom skúšky je 23°C (+/- 2K) a relatívna vlhkosť +/- 5 %. [6]

Nás budú zaujímať parametre ako izolačný odpor, relatívna permitivita, stratový činiteľ a závislosti týchto parametrov na vonkajšie vplyvy. Tieto parametre sú rozpísané v kapitole 3.1

## 1.3 Polarizácia dielektrika

Polarizácia dielektrika je jav, ktorý nastáva po vložení dielektrika do elektrického poľa. Z atómov alebo molekúl dielektrika sa pri polarizácii pôsobením príťažlivej a odpudivej elektrickej sily, stanú elektrické dipóly. Dielektrikum sa polarizuje na základe pôsobenia vnútorného elektrického poľa (nepolárne dielektriká), alebo bez pôsobenia elektrického poľa (polárne dielektriká), a dochádza v ňom k niekoľkým polarizáciám a to k: [1, 3, 4]

- Deformačnej polarizácii
- Relaxačnej polarizácii
- Migračnej polarizácii

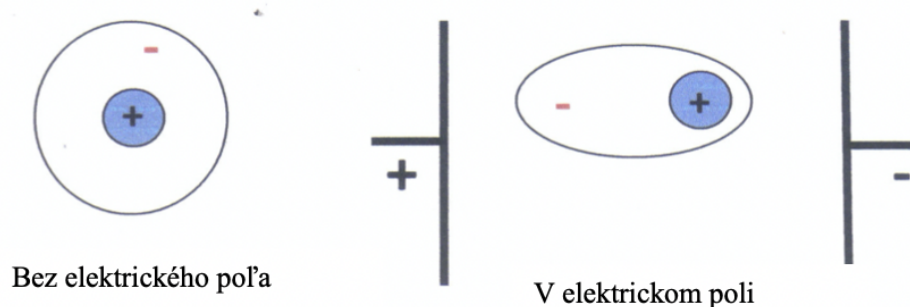
### 1.3.1 Deformačná polarizácia (Pružná)

Pri takejto polarizácii dochádza k malému posunutiu pružne viazaných nábojov (elektrónov, iónov), ktoré aj tak ovplyvnia relatívnu permitivitu dielektrík, keďže dochádza k posunutiu veľkého množstva nosičov. Keďže tento dej nie je prakticky závislý ani na tlaku, ani na frekvencii, môžeme povedať, že deformačná polarizácia prebieha bez straty energie v dielektriku. Pod deformačnú polarizáciu patria: [1, 3]

- Elektrónová polarizácia
- Iónová polarizácia

#### Elektrónová polarizácia

Dochádza k nej vždy, v každej látke a vo všetkých skupenstvách. Prejavuje sa posunutím jadier atómov a elektrónov v atómovom obale viď obr.1.2 .

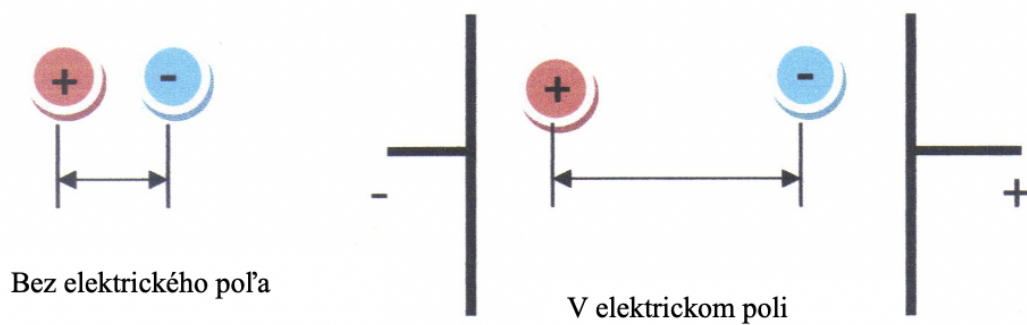


Obr. 1.2: Ukážka elektrónovej polarizácie (Prevzaté z [3])

Takýmto posunutím získa atóm indukovaný dipólový moment, ktorého veľkosť je daná veľkosťou elektrického poľa a schopnosťou atómu sa polarizovať. S posunutím súvisí rýchlosť (doba) ustálenia, ktorá je rádovo od  $10^{-16}$  až  $10^{-13}$  sekúnd. Takáto polarizácia nesúvisí so zmenou teploty a je frekvenčne nezávislá, keďže tento dej prebieha vo vnútri atómu a takáto polarizácia je bez straty energie. [1, 3]

#### Iónová polarizácia

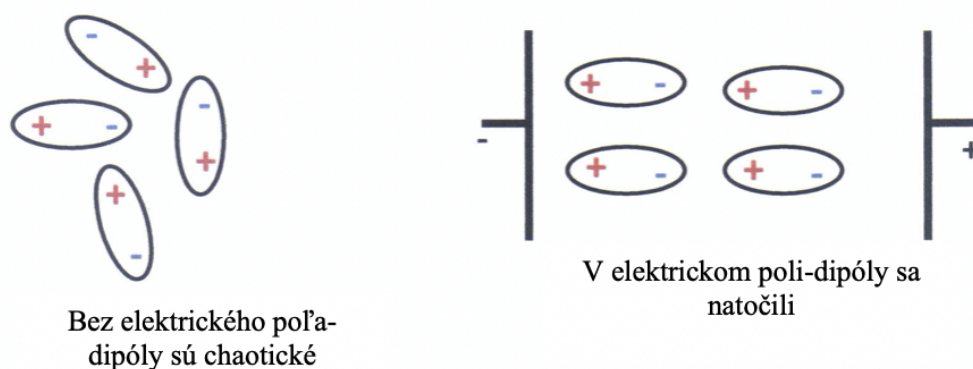
Rozdielom oproti elektrónovej polarizácii je to, že dipólové momenty existujú aj bez prítomnosti vnútorného elektrického poľa. Vzniká v izolantoch s iónovou väzbou, kde sa navzájom posúvajú kladné a záporné ióny viď obr.1.3 . Doba ustálenia je väčšia ako pri elektrónovej polarizácii, rádovo od  $10^{-13}$  až  $10^{-12}$  sekúnd. Táto polarizácia súvisí so zmenou teploty, je frekvenčne závislá a je tiež bez straty energie. [1, 3]



Obr. 1.3: Ukážka iónovej polarizácie (Prevzaté z [3])

### 1.3.2 Relaxačná polarizácia

Relaxačná polarizácia je jav, ktorý sa vyskytuje v izolantoch, ktorých polárne častice (napr. dipólové molekuly alebo ióny) prechádzajú postupne z nepolarizovaného do polarizovaného stavu pri pôsobení elektrického poľa. Kvôli pohybu týchto nosičov elektrického náboja je relaxačná polarizácia teplotne závislá a dochádza pri nej k stratám v dielektriku. Tepelný pohyb nosičov je chaotický bez prítomnosti elektrického poľa a všetky možné polohy nosičov sú rovnako pravdepodobné a nedochádza k nerovnomernému rozloženiu. Po priložení elektrického poľa zmeníme pomery a nosiče nábojov sa stanú pravdepodobnejšími. Tým sa rozloženie nosičov náboja v jednotke objemu stane nerovnomerným, vznikne asymetria a jednotka objemu získa dipólový moment – dôjde k relaxačnej polarizácii viď obr.1.4 .[1, 3]



Obr. 1.4: Ukážka relaxačnej polarizácie (Prevzaté z [3])

Nárast relaxačnej polarizácií je časovo závislý a silne závislý na vnútorných podmienkach. Takýto priebeh sa dá popísať exponenciálnou funkciou, ktorá sa k ustálenému stavu blíži asymptoticky. Pri tomto prechodovom deji sa časová konštanta nazýva relaxačná doba a je charakteristickou hodnotou pre polarizáciu. Oproti deformačnej polarizácií je doba ustálenia a vzdialenosti nosičov, ktoré sa posunú oveľa väčšie. K relaxačnej polarizácií patrí: [1, 3]

- Iónová relaxačná polarizácia
- Dipólová relaxačná polarizácia

### **Iónová relaxačná polarizácia**

Vyskytuje sa v dielektrikách zložených z iónov, ktoré sú nepravidelne usporiadané. Takéto látky sú citlivé na elektrické pole a dochádza pri nich k polarizácií iónov v medzerách štruktúry. Kvôli dlhším časom potrebných k ustáleniu relaxačnej doby je táto polarizácia frekvenčne a teplotne závislá, a je so stratami energie.[1, 3]

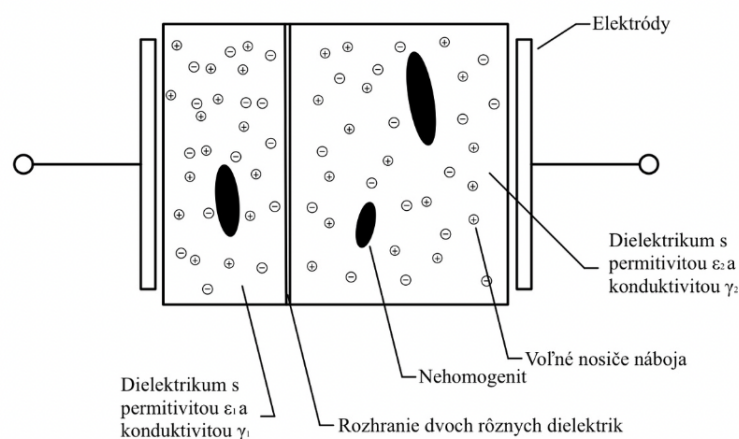
### **Dipólová relaxačná polarizácia**

Vyskytuje sa v dielektrikách v ktorých už existujú dipóly pred polarizáciou, ale sú neusporiadané a pri polarizácií sa dipóly postupne natáčajú po vložení do elektrického poľa vid' obr.1.4 . Niekedy je táto polarizácia označovaná tiež ako tepelná orientačná polarizácia alebo Debeyova polarizácia. Táto polarizácia je silne závislá na teplote, a taktiež ako predošlá je so stratami energie. [1, 3]

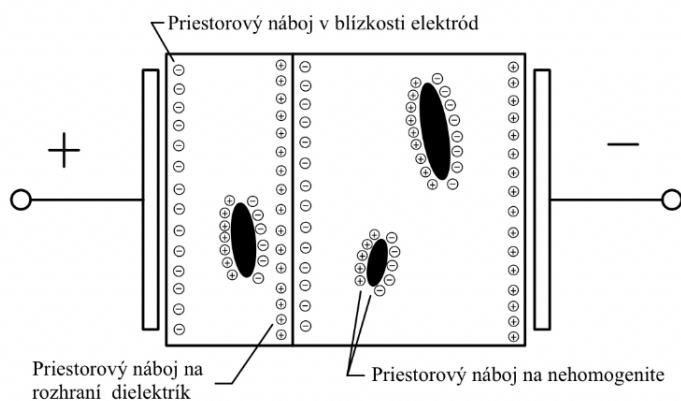
### **1.3.3 Migračná polarizácia**

Ak sa v dielektriku nachádzajú voľné nosiče elektrického náboja, hovoríme o migračnej polarizácií alebo o polarizácií vznikajúcej priestorovým nábojom. V danom dielektriku pre vznik priestorového náboja je podmienka aj pre existenciu makroskopických nehomogenitov. Nehomogenitu sa rozumie nejaká nečistota, bublinka, prasklina alebo iné defekty v dielektriku. Tieto defekty majú inú relatívnu permitivitu a konduktivitu ako zvyšok dielektrika. Keďže nosiče v dielektriku a na týchto plochách vytvárajú dve rozdielne prostredia, tak sa nosiče elektrického náboja na týchto plochách ľahko zachytávajú. S porovnaním s predošlými polarizáciami sú tieto najpomalšie a sú spojené so stratami energie. Zmenu pred a po priložení elektrického poľa na nehomogénne dielektrikum je vidieť na obr.1.51.6. Takýto priestorový náboj sa najčastejšie objavuje pri vysokonapäťových zariadeniach pracujúcich s jednosmerným napätím. V minulosti o priestorový náboj nebol veľký záujem, no so zvyšovaním využitia kompozitných materiálov a keramických látok o neho záujem rastie. [1]





Obr. 1.5: Pred priložením elektrického poľa (Prevzaté a upravené z [1])

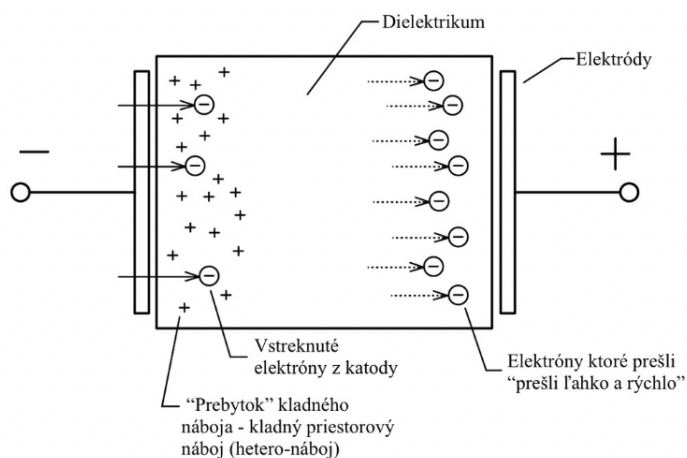


Obr. 1.6: Po priložení elektrického poľa (Prevzaté a upravené z [1])

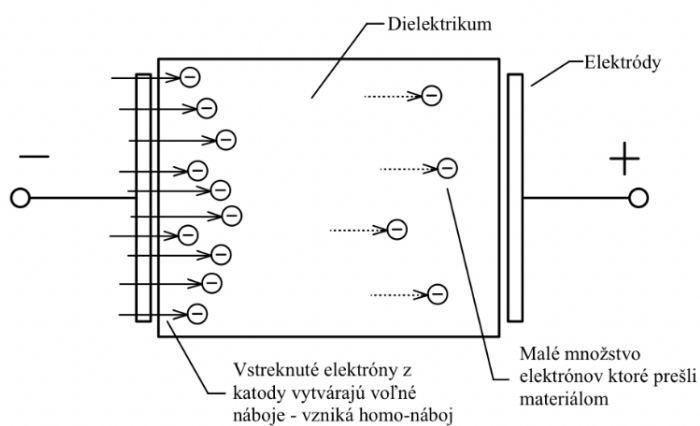
### Vznik priestorového náboja

Z vyššie uvedeného vyplýva, že na vznik priestorového náboja sú za potrebné nielen nehomogenity ale taktiež prítomnosť voľných nosičov elektrického náboja. Tie získavame tzv. vstrekováním nosičov náboja z elektród k materiálu. Hlavnú úlohu pri vzniku takéhoto náboja hrajú voľné elektróny. Elektróny môžu byť vstrekované aj vplyvom čiastočných nábojov v dutinkách materiálu, ktoré sú bombardované o energii až 25 eV a pri tejto energii elektróny preniknú do materiálu a vytvoria významný priestorový náboj. Na základe tejto teórie vravíme o vzniku dvoch druhov

priestorového náboja. Prvý druh je hetero-náboj a druhý homo-náboj. Vznik týchto nábojov je znázornený na obr.1.71.8. [1]



Obr. 1.7: Vznik hetero-náboja v blízkosti katódy (Prevzaté a upravené z [1])



Obr. 1.8: Vznik homo-náboja v blízkosti katódy (Prevzaté a upravené z [1])

Štúdium o priestorovom náboji môže pomôcť pri popise pomeru na rozhraní materiál-nehomogenita a môže objasniť aj vplyvy takéhoto náboja na vlastnosti viacvrstvových izolačných materiálov. [1]

## Účinky priestorového náboja

Účinkom využitia priestorového náboja je, že ovplyvňuje vodivé javy v materiály a jeho elektrickú pevnosť, tým že výrazne skreslí priebeh intenzity elektrického poľa v hrúbke materiálu. Vďaka tomu môže dôjsť k prierazu v blízkosti elektródy a nie v mieste s najväčšou intenzitou, čiže vstrekovanie elektrónov môže spôsobiť elektrický prieraz. [1]

## 1.4 Elektrická vodivosť dielektrík

Z teoretického hľadiska, by sme chceli izolant, ktorý je bez voľných nosičov náboja a iných poškodení. No na začiatok si treba uvedomiť, že žiadny technický izolant nebude mať v praxi nenulový počet voľných elektrónov a to kvôli následkom znečistenia alebo poškodenia. Na základe tohto faktu je treba s týmto v praxi počítať pri voľbe daného materiálu. Pre zhodnotenie materiálu z hľadiska elektrickej vodivosti sa zaviedli pojmy merný elektrický odpor – rezistivita  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] a merná elektrická vodivosť – konduktivita  $\gamma$  [ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ]. Merné preto, že odpor a vodivosť je vzťahnutá k jednotke objemu, aby sme mohli jednotlivé materiály medzi sebou porovnávať. Vzťah medzi týmito veličinami je nasledujúci: [1]

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (1.1)$$

Merný elektrický odpor vyjadrujeme za predpokladu plochého vzorku a pri predpoklade homogénneho poľa ako: [1]

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h}, \quad (1.2)$$

kde  $S [\text{m}^2]$  je plocha elektród,  $h [\text{m}]$  je hrúbka vzorku a  $R$  v [ $\Omega$ ] je hodnota zmeraného izolačného elektrického odporu. [1]

Izolačný elektrický odpor je hodnota vypočítaná z priloženého napätia a prechádzajúceho prúdu z ohmového zákona, kde túto hodnotu neprevádzame na rozmery skúšaného predmetu. Pre výpočet vyššie uvedenej rezistivity je potrebné tento odpor previesť na rozmery skúšaného predmetu. [1]

V každej látke podľa typu materiálu, z ktorej je vyrobená je rozdielny vznik a pohyblivosť voľných nosičov elektrického náboja. Tieto odlišnosti spôsobuje rozdielna vzdialenosť častíc v rozdielnych skupenstvách. Preto si popíšeme elektrickú vodivosť pre všetky tri skupenstvá. [1]

### 1.4.1 Elektrická vodivost' plynných izolantov

Plynné izolanty majú malú koncentráciu voľných nosičov elektrického náboja a preto môžeme povedať, že sa jedná o veľmi dobré izolanty. Nosiče elektrického náboja vznikajú prevažne pôsobením ionizačných činiteľov elektrického pôvodu, rádioaktívneho alebo kozmického žiarenia. Kvôli týmto činiteľom dochádza k uvoľneniu jedného alebo viacej elektrónov z neutrálneho atómu a vznikajú voľné nosiče náboju - ionizácia plynu. Najčastejšie k tomu dochádza, keď plyn pohltí dostatok tzv. ionizačnej energie, ktorá obsahuje:[1]

- Nárazová ionizácia – po náraze neutrálnej častice s elektrónom alebo iónom sa vplyvom elektrického poľa a vysokej teploty táto neutrálna častica ionizuje. Touto zrážkou sa myslí interakcia silových polí týchto častíc, ktoré preletia blízko seba a vychýlia sa ich dráhy. Pre takúto ionizáciu musí byť splnená nasledovná podmienka: [1]

$$W_i \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (1.3)$$

kde  $W_i$  [J] je ionizačná energia,  $m$  [kg] je hmotnosť ionizujúcej častice a  $v$  [m·s<sup>-1</sup>] je rýchlosť ionizačnej častice. [1]

- Foto-ionizácia – neutrálna častica sa ionizuje pohltením fotónu a musí byť splnená podmienka : [1]

$$W_i \geq h \cdot \nu, \quad (1.4)$$

kde  $h$  je Planckova konštanta ( $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$  J·s) a  $\nu$  [Hz] je frekvencia žiarenia. [1]

- Povrchová ionizácia – z povrchu elektród sa uvoľňujú elektróny, takže prúd pretekajúci plynom je závislý na použitom kove elektród, čo znamená, že vodivosť nie je charakteristická pre daný plyn medzi elektródami. [1]

V slabých elektrických poliach sa prejavuje nesamostatná elektrická vodivosť plynov a platí pri tom približne ohmov zákon. Naopak u silných elektrických poliach dochádza k samostatnej vodivosti, pretože na elektróny pôsobí veľká sila a rýchle elektróny spôsobia štiepenie neutrálnych častíc na ióny. Následkom toho dôjde ku zvýšeniu prúdu a prerazu izolačného plynu. [3]

### 1.4.2 Elektrická vodivost' kvapalných izolantov

Kvapalné izolanty sú buď polárne alebo nepolárne kvapaliny. Silne polárne kvapaliny (voda, alkohol), kvôli veľkej permitivite sú už pri izbovej teplote dostatočne ionizované a preto ich nemôžeme považovať za izolanty, nazývame ich elektrolytmi (vodiče 2 triedy). U nepolárnych kvapalinách sa tento efekt prakticky neobjavuje.[2]

Elektrickú vodivosť kvapalných izolantov ovplyvňujú rôzne prímеси alebo nečistoty v kvapaline. Preto kvapalné izolanty ďalej delíme na extrémne čisté a technicky

čisté. Extrémne čisté majú malú konduktivitu ( $\gamma=10^{-14}$  až  $10^{-15}$  S·m<sup>-1</sup>) spôsobenú voľnými nosičmi elektrického náboja. Voľné nosiče elektrického náboja môžu vzniknúť ionizáciou, disociáciou, tepelnou excitáciou elektrónov alebo emisiou elektrónov z katódy. Technicky čisté kvapalné izolanty majú konduktivitu ( $\gamma=10^{-11}$  až  $10^{-152}$  S·m<sup>-1</sup>). Rozdiely medzi chovaním extrémne a technický čistých kvapalných izolantov sú nasledovne. V slabom elektrickom poli dochádza k nesamostatnej vodivosti od iónov prímеси a nečistôt, a v silnom poli sa prejaví samostatná elektrónová vodivosť. To znamená, že po prekročení určitej intenzity elektrického poľa nastáva veľký nárast prúdu a prieraz.[1, 3]

### 1.4.3 Elektrická vodivosť pevných izolantov

Pevné izolanty oproti plynným a kvapalným majú najväčšiu hustotu látky. V pevných izolantoch predpokladáme iónový charakter vodivosti, môže sa však vyskytnúť aj elektrónový charakter ale iba veľmi zriedka. Overenie charakteru vodivosti je veľmi ťažké kvôli malej vodivosti pevných izolantov. Na overenie iónového charakteru sa využíva za určitých podmienok Faradayov zákon. Ten hovorí, že jeden gram ekvivalent látky vylúčenej pri elektrolyze je úmerné množstvu prejdeného náboja o veľkosti jedného Faradaya elektrolytom. Keďže pri malom prúde je aj málo vylúčenej látky na elektródach, tak je táto metóda využiteľná iba pri iónových kryštáloch a anorganických skiel. Pri polymérnych izolantov tento spôsob určenia iónového charakteru nie je možný. Na dôkaz elektrónového charakteru vodivosti sa využíva Hallovo efektu. Ten vytvára rozdiel elektrických potenciálov na stenách vzorky, rovnobežných so smerom pôsobiaceho elektrického poľa, pri pôsobení magnetického poľa na pretekajúci prúd. Ani týmto spôsobom neoveríme charakter vodivosti polymérových izolantov, kvôli nedostatočnej rýchlosti elektrónov, ktoré nevytvoria dostatočne merateľné Hallove napätie. Preto je vysvetlenie elektrickej vodivosti pevných izolantov omnoho zložitejšie ako pri plynných alebo kvapalných izolantov.[1, 2]

Pre ďalšie úvahy si rozdelíme pevné izolanty na tri skupiny:

- Iónové kryštalické látky
- Anorganické amorfné látky
- Organické amorfné látky

Iónové kryštalické látky sú štruktúrované ako mriežky v uzloch, v ktorých sú kladné a záporné ióny. Pán Frenkel uvažoval, že ióny kmitajúce pri istej teplote dosiahnu dostatočnú energiu nato, aby opustili svoje miesto v uzle mriežky a preskočili do priestoru medzi uzlami. Koncentrácia takýchto defektov sa vypočíta nasledovne: [1, 2]

$$n_F = N_F \cdot e^{-\frac{W_F}{2kT}}, \quad (1.5)$$

kde  $N_F$  je počet mriežkových miest a  $W_F$  je energia potrebná na prechod iónu do intersticiálnej polohy – je daná rozdielom energií iónu v uzle mriežky (jej veľkosť je 1 až 2 eV). Ión v tejto polohe potrebuje oveľa nižšiu energiu na prekonanie potenciálnej bariéry, aby sa dostal do susednej intersticiálnej polohy a tak prispel svojou pohyblivosťou ku vodivosti. [1, 2]

Ďalšou poruchou mriežky môžu byť tzv. Schottkyho poruchy. Tie sú vyznačené tým, že sa v mriežke kryštálu vyskytuje rovnaký počet voľných miest po kladných a záporných iónoch, ktoré opustili svoje miesto v uzloch mriežky a usadili sa na povrchu kryštálu. [1, 2] Koncentrácia takýchto porúch sa vypočíta nasledovne:

$$n_F = \beta \cdot N_S \cdot e^{-\frac{W_S}{2 \cdot kT}}, \quad (1.6)$$

kde  $N_S$  je počet iónových párov,  $W_S$  je energia potrebná na odtrhnutie jedného kladného a záporného iónu z uzlového miesta vnútri mriežky kryštálu, a  $\beta$  je koeficient, ktorý uvažuje zmenu frekvencií vlastných kmitov v blízkosti vakantných uzlov mriežky. V tomto prípade je elektrická vodivosť spôsobená kvôli prechodom susedných iónov do blízkeho voľného miesta. [1]

Anorganické amorfné látky predstavujú rôzne druhy skiel, ktorých elektrická vodivosť sa veľmi líši a to od  $10^{-3}$  až  $10^{-17} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Kvôli účinkom vnútorného elektrického poľa sa pohybujú slabo viazané ióny v skle a to spôsobuje elektrickú vodivosť. [1]

Organické amorfné látky sú syntetické alebo prírodné makromolekulárne látky. Bežné používané materiály (polystyrén, polyetylén) majú elektrickú vodivosť menšiu ako  $10^{-17} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ . V týchto látkach sa predpokladá iónový charakter. Elektrická vodivosť je závislá na čistote daného polyméru. [1]

Doteraz sme popisovali vnútornú vodivosť pevných izolantov a teraz si povieme niečo o povrchovej vodivosti pevných materiálov.

## **Povrchová vodivosť pevných izolantov**

Povrchová elektrická vodivosť je nežiadúca, pretože hrozí nebezpečenstvo úrazu. Spôsobujú ju rôzne nečistoty na povrchu materiálu, napríklad voda. [3]

Elektrická vodivosť je spôsobená pohybom voľných nosičov elektrického náboja po povrchu, tým pádom úzko súvisí s relatívnou vlhkosťou okolia.

Merná povrchová vodivosť  $\gamma_P$  je definovaná ako podiel prúdu tečúceho povrchom izolantu  $I_P$  ku intenzite elektrického poľa  $E$ : [1]

$$\gamma_P = \frac{I_P}{E}, \quad (1.7)$$

a za predpokladu priestorového usporiadania vieme tento vzťah upraviť ako: [1]

$$\gamma_P = \frac{I}{l_e} \cdot \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{le}, \quad (1.8)$$

kde  $I$  [A] je celkový prúd tečúci povrchom,  $U$  [V] je napätie na elektródach,  $d$  [m] je vzdialenosť elektród a  $l_e$  [m] je dĺžka elektród na povrchu izolantu.

Povrchovú elektrickú vodivosť je na základe tohto vzťahu možno hodnotiť na základe merného povrchového elektrického odporu  $\rho_p$  [ $\Omega$ ] ako: [1]

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d}, \quad (1.9)$$

kde  $R_p$  [ $\Omega$ ] povrchový elektrický odpor materiálu nameraný medzi rovnobežnými elektródami. [1]

## 1.5 Dielektrické straty

Dielektrickými stratami rozumieme jav, pri ktorom sa elektrická energia vďaka dejom odohrávajúcim sa v štruktúre izolantu po jeho zatažení zmení na objem, za jednotku času, v inú, väčšiu tepelnú energiu. To znamená, že vplyvom tohto javu sa izolant ohrieva. Toto vzniknuté teplo je nutné odvádzať do okolia aby nedošlo k vyššej teplote a tak k prierazu alebo deštrukcii izolantu. Dielektrické straty vznikajú kvôli vyššie spomínaným pohybom voľných a viazaných nosičov elektrického náboja, ktoré obsahuje materiál. So stratou energie je teda spojená elektrická vodivosť a rôzne druhy polarizácií. Z fyzikálneho hľadiska rozdeľujeme straty na vodivostné, polarizačné a ionizačné. [1]

Vodivostné straty vznikajú vo všetkých izolantoch, pretože každý izolačný materiál obsahuje voľné elektróny, ktoré sa po vložení do elektrického poľa začnú pohybovať a to je sprevádzané premenou elektrickej energie na teplo. [8]

Výrazný podiel na celkovej výške strát majú polarizačné straty. Závisia na teplote dielektrika a na frekvencii pôsobiaceho elektrického poľa.

Ionizačné straty vznikajú v kvapalných alebo pevných materiáloch po prekročení napätia nad hodnotu počiatočného napätia výbojovej činnosti. [1]

Dielektrické straty vznikajú pri jednosmernom aj pri striedavom napätí. Pri jednosmernom napätí sú dielektrické straty spôsobené vodivosťou materiálu, a pri striedavom napätí sa navyše vyskytuje ešte polarizačná a ionizačná zložka. [8]

Pri jednosmernom napätí veľkosť strateného výkonu môžeme definovať ako:

$$P_{ZJS} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (1.10)$$

kde  $R_i$  [ $\Omega$ ] je izolačný odpor dielektrika,  $U$  [V] je napätie priložené na dielektriku a  $I$  [A] je prúd prechádzajúci dielektrikom. [1]

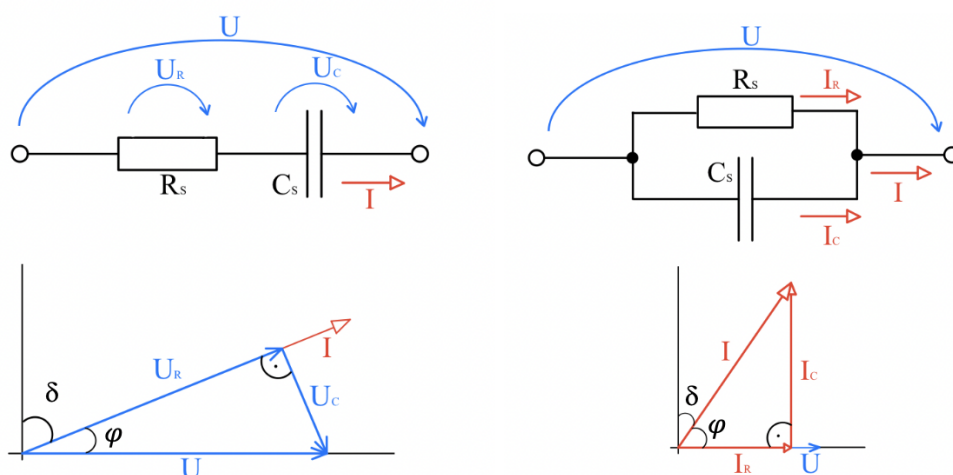
Keď priložíme striedavé napätie na dielektrikum, tak ako sme uviedli vyššie budú sa na dielektriku uplatňovať nielen dielektrické straty ale aj straty polarizačné a ionizačné. Súčet týchto strát je väčší ako pri jednosmernom napätí. Preto pri striedavom

napätí uvažujeme tzv. stratový uhol  $\delta$ . Ten je následkom toho, že pri striedavom napätí sa priebeh elektrickej indukcie oneskoruje za priebehom elektrickej intenzity práve o tento uhol. V praxi sa dielektrické straty vyjadrujú pomocou tangenty stratového uhla  $\delta$  a nazývame ich stratový činiteľ  $\tan\delta$ . Tak ako aj pri jednosmernom napätí tak aj pri striedavom sa dielektrické straty dajú vyjadriť pomocou stratového výkonu a to ako :

$$P_{ZST} = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan\delta, \quad (1.11)$$

kde  $C$  je kapacita daná súčtom kapacít  $C_0$ , ktorá je následkom absorpčných javov a činnou zložkou prúdu, a  $C_p$  odpovedá jalovej zložke prúdu. Pri popise technického dielektrika v striedavom poli z hľadiska dielektrických strát sa používajú tzv. náhradné obvody. Jedná sa o sériový a paralelný obvod, ktoré tvoria ideálny kondenzátor a odpor. Tieto obvody musia spĺňať požiadavky, tak aby činný výkon a fázový uhol stratovej sústavy bol ekvivalentný stratovému výkonu a fázovému uhlu stratového dielektrika.[1, 8]

Pre sériové zapojenie sa stratový činiteľ a stratový výkon vypočíta na základe uvedených schém a fázorového diagramu obr.1.9 : [1]



Obr. 1.9: Sériové (vľavo) a paralelné zapojenie (v pravo) (Prevzaté a upravené z [1])

$$\tan\delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s, \quad (1.12)$$

$$P_Z = \frac{\omega \cdot C_s \cdot U^2 \cdot \tan\delta}{1 + \tan^2\delta}, \quad (1.13)$$

Pre paralelné zapojenie sa stratový činiteľ a stratový výkon vypočíta na základe uvedených schém a fázorového diagramu obr.1.9 : [1]

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p}, \quad (1.14)$$



$$P_Z = \omega \cdot C_P \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.15)$$

Pre malé hodnoty  $\operatorname{tg} \delta$  sa obe schémy líšia iba trochu za predpokladu, že sa budú rovnať impedancie a činné a jalové zložky. Rozdiely sa objavajú až pri dielektrikách s väčšími dielektrickými stratami. Využitie paralelného obvodu je pri reálnych kondenzátoroch v širokom frekvenčnom pásme. Sériový obvod nájde využitie pri kondenzátore, v ktorom vznikajú straty prevažne odporom z prívodu a elektród. [1]

V praxi sa stratový činiteľ využíva na posúdenie kvality daného izolantu, tak že materiál s  $\operatorname{tg} \delta$  menší ako  $10^{-3}$  je kvalitný, a s  $\operatorname{tg} \delta$  väčší ako  $10^{-2}$  je nekvalitný. O presnejšom posúdení materiálu je nutné pozrieť sa na závislosti stratového činiteľa  $\operatorname{tg} \delta$  na napätí, frekvencii a teplote. Taktiež k posúdeniu dielektrika z hľadiska dielektrických strát je možné použiť tzv. merné dielektrické straty, tie sú vzťahnuté ku jednotke objemu. [1]

Pri jednosmernom napätí uvažujeme:

$$p_{ZJS} = \frac{P_{ZJS}}{V} = \frac{U^2}{R_V \cdot d \cdot S} = \frac{E^2 \cdot d^2}{\rho_V \cdot \frac{d}{S} \cdot d \cdot S} = \gamma_V \cdot E^2, \quad (1.16)$$

kde  $R_V$  [ $\Omega$ ] je odpor dielektrika,  $\rho_V$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] je vnútorná rezistivita dielektrika  $\gamma_V$  [ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ] je vnútorná konduktivita dielektrika a  $E$  [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ] je intenzita vnútorného elektrického poľa. Pri striedavom napätí uvažujeme:

$$p_{ZST} = \omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.17)$$

kde  $\varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$  je stratové číslo a  $\varepsilon_0$  je permitivita vákua. [1]

Ako je vidieť z vyššie uvedených vzťahov dielektrické straty závisia na intenzite elektrického poľa a frekvencii. [1]

Ďalej si rozpíšeme dielektrické straty v rôznych typoch izolantoch ako sú plyny, kvapaliny a pevné izolanty.

### 1.5.1 Dielektrické straty v plyných izolantoch

Aj keď sú plyny takmer ideálne izolanty aj oni majú isté chyby. V elektrickom poli sa elektrické náboje pohybujú a tento pohyb je spojený s premenou elektrickej energie na teplo, čo je definícia dielektrických strát. Tento pohyb nastáva pri jednosmernom ale aj pri striedavom napätí. Dielektrické straty v plynách sa zväčšujú kvôli ionizačným stratám, ktoré vznikajú zvyšovaním počtu voľných nábojov. Tieto voľné náboje sa začínajú rýchlo zvyšovať po prekročení ionizačného napätia. Dielektrické straty v plynách sú veľmi malé pokiaľ sa v nich nevyskytuje ionizácia, hlavne pri vysokých frekvenciách môžeme považovať plyny za dokonalé izolanty. No pri vysokých napätiach a nehomogénnom poli pri ktorých nastáva ionizácia sa v plyne začnú objavovať ionizačné straty. V praxi sa používa tzv. ionizačná krivka na posúdenie kvality izolácie. Ionizačné napätie má byť oveľa vyššie ako je najvyššie napätie používané v

prevádzke. Na základe zmien v ionizačnej krivke sa dá určiť starnutie izolácie alebo chybu pri výrobe. V súvislosti s týmto sú napríklad malé dutinky vzduchu v izolante a pri prekročení ionizačného napätia sa dielektrické straty zvýšia natoľko, že môže dôjsť k zvýšeniu teploty a tým pádom ku tepelnej deštrukcii materiálu. [8]

### 1.5.2 Dielektrické straty v kvapalných izolantoch

Dielektrické straty v kvapalných izolantoch môžu vzniknúť iba pri kvapalinách s kovalentnou väzbou, ktoré sa delia na neutrálne (nepolárne) a dipólové (polárne). [8]

Neutrálna izolačná kvapalina, ktorá je čistá má polarizačnú zložku nulovú, takže je dielektricky bezstratová. Elektrickú vodivosť v neutrálnych izolačných kvapalinách spôsobujú voľné elektrické náboje, ktoré vznikajú disociáciou nečistôt. Čím viac nečistôt tým väčšia elektrická vodivosť a tým pádom aj väčšie dielektrické straty. V praxi sa nečistoty pomerne dobre odstraňujú takže dielektrické straty sú v kvapalných izolantoch pomerne malé (napr. transformátorový olej). [8]

Dipólové izolačné kvapaliny majú okrem vodivostnej straty aj polarizačné straty. Ich vodivostné zložky sú väčšie ako pri neutrálnych, pretože sa ťažšie čistia, tým pádom majú väčšiu vodivosť a aj dielektrické straty. Dielektrické straty pri dipólových kvapalinách závisí na teplote a na frekvencii. [8]

### 1.5.3 Dielektrické straty v pevných izolantoch

V pevných izolantoch sa vyskytujú všetky tri typy strát – vodivostné, polarizačné a ionizačné. Preto pevné izolanty delíme z hľadiska dielektrických strát po skupinách charakterizované typom polarizácií: [1, 8]

- Neutrálne pevné izolanty – vlastnosti týchto látok sú podobné ako pri neutrálnej izolačnej kvapaline, to znamená že v týchto materiáloch sa vyskytuje iba elektrónová polarizácia. Preto sú dielektrické straty veľmi malé, keďže sa uplatňujú iba straty vodivostné.
- Dipólové pevné izolanty – obsahujú okrem elektrónovej polarizácií aj dipólovú, ktorá už je spojená aj s dielektrickými stratami. Uplatňujú sa straty vodivostné a polarizačné.
- Iónové kryštály – vyskytuje sa tu elektrónová a iónová polarizácia (pri iónových kryštáloch s menším počtom porúch kryštálovej mriežky), takže dielektrické straty sú len vodivostné. Pri iónových kryštáloch s vyšším počtom porúch kryštálovej mriežky sa vyskytuje pružná a iónová relaxačná polarizácia, ktorá je spojený s dielektrickými stratami.

- Iónové amorfné látky – vyskytuje sa tu elektrónová a iónová relaxačná polarizácia, ktorá je spojená s dielektrickými stratami. Dielektrické straty sú teda vodivostné a polarizačné. [1, 8]

## 1.6 Elektrická pevnosť

Každý izolant musí spĺňať izolačné podmienky pre ktoré bol vyrobený. Táto schopnosť zachovávať si svoju izolačnú kvalitu sa nazýva elektrická pevnosť. Túto kvalitu si však vie udržať iba do určitej veľkosti elektrického poľa. Po prekročení intenzity sa odpor izolantu znižuje, prúd narastá a keďže izolanty nie sú dobrými vodičmi tak sa začnú zahrievať. Toto teplo za určitý čas spôsobuje stratu izolačných vlastností. Po prekročení elektrickej pevnosti daného materiálu vplyvom degradácie izolácie vzniká výboj, pretože z izolácie sa stáva vodič. Tento výboj má 2 štádiá. V prvom dochádza k nárastu konduktivity a následnému výboju. Po odznení výboja sa uplatnia degradačné účinky, ktoré závisia na štruktúre daného materiálu. Kvôli tejto degradácii potom vzniká elektrický oblúk. Pri elektrickom prieraze vzniká napätie, ktoré nazývame prierazné napätie  $U_p$  [V], ktoré je závislé na type a hrúbke izolantu  $h$  [m]. Z týchto dvoch hodnôt vyjadrujeme vzťah pre elektrickú pevnosť  $E_p$  [ $V \cdot m^{-1}$ ] takto: [1, 2]

$$E_p = \frac{U_p}{h}. \quad (1.18)$$

Keďže je elektrická pevnosť závislá na napätí hovoríme potom o striedavej, jednosmernej a impulznej elektrickej pevnosti. Striedavá elektrická pevnosť je plynulá alebo stupňovitá. Impulzná sa zisťuje tzv. rázovým napätím. O jednosmernej elektrickej pevnosti vieme, že môže byť až 2x väčšia ako striedavá. [1]

Tak ako pri dielektrických stratách a elektrickej vodivosti aj pri elektrickej pevnosti rozlišujeme plynné, kvapalné a pevné izolanty.

### 1.6.1 Elektrická pevnosť plynných izolantov

Pri plynných izolantoch uvažujeme informácie, ktoré sme si uviedli v kapitole 1.4 a 1.4.1. V plynných izolantoch môžu vznikať samostatné a nesamostatné výboje. Samostatné výboje majú ako zdroj iba elektrické napätie, ktoré stačí na vytvorenie voľných nosičov náboja a uvedenie ich do pohybu. Nesamostatné potrebujú pre vznik ionizačné činidle a existujú iba pri pôsobení cudzích zdrojov (žiarenie alebo externý zdroj elektrónov). Ďalej v plynných izolantoch môžu vznikať tzv. Townsendovy výboje, kanálový výboj a výboje v nehomogénnom poli. Elektrická pevnosť plynov je závislá na frekvencii. [1, 2]

### 1.6.2 Elektrická pevnost kvapalných izolantov

Elektrickú pevnosť kvapalných izolantov môžu ohrozovať iba nejaké nečistoty a kvapky vody. Tieto nečistoty môžu znižovať elektrickú pevnosť až o 20%. Z tohoto dôvodu sa kvapalné izolanty ako napr. transformátorový olej čistia veľmi dôkladne a zabezpečuje sa minimálna vlhkosť. Elektrická pevnosť však pri kvapalinách je veľmi zložitý. Následkom toho vzniklo mnoho teórií ale ani jedna nepopisuje elektrickú výboje v kvapalinách obecné ale každá iba za určitých zjednodušených predpokladoch. Aj napriek tomu uvažujeme isté charakteristické rysy: [2]

- Majú väčšiu elektrickú pevnosť ako plynné izolanty.
- Výboj vzniká pri miestach kde sa nachádzajú nečistoty.
- Na veľkosť preskokového napätia má vplyv aj materiál a povrch elektród.
- Mechanizmus preskoku môže mať rôzny charakter

[1] Na meranie elektrickej pevnosti kvapalných izolantov sa používajú tzv. extrémne čisté kvapalné izolanty. Tie sa získavajú niekoľkonásobnou filtráciou. Takéto kvapaliny majú elektrickú pevnosť 80 až 100 kV·mm<sup>-1</sup>. Táto hodnota je už zrovnateľná s hodnotami pevných izolantov. [2]

### 1.6.3 Elektrická pevnosť pevných izolantov

Keď vznikne preskok v pevných izolantoch je to nevratný dej nazývaný prieraz. Týmto prierazom sa vytvorí vodivá cesta, ktorá už v izolante ostane. Preto na presnejšie meranie elektrickej pevnosti je potrebné viac vzoriek, čo môže byť finančne nákladné. Pierazy v pevných izolantoch rozlišujeme na tri typy: čisté elektrický prieraz, tepelný prieraz a elektrochemický prieraz. [1]

#### Tepelný prieraz

Pri tepelnom prieraze sa uplatňujú Joulové straty, keďže izolant nemá nekonečný odpor a tak ním prechádza malý prúd, ktorý izolant zahrieva. Tepelné namáhanie je v každom mieste iné, najväčšie je v najviac namáhaných častiach kde preteká najväčší prúd. Tepelná odolnosť patrí medzi kritéria, podľa ktorých rozdeľujeme izolanty do tried (tzv. tepelné triedy). Tieto tepelné triedy sú určené normou ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Teplotní klasifikace“. Po prekročení daných teplôt z tejto normy vodič nedokáže odvádzať dostatok tepla do okolia a dochádza k roztaveniu izolantu a k následnému prierazu. Dynamická rovnováha nastane pri nízkych napätiach medzi teplom, ktorý izolant produkuje a odvádza do okolia. Túto dynamickú rovnováhu vieme vyjadriť nasledovným vzťahom:

$$c \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}\vartheta) = \gamma \cdot E^2, \quad (1.19)$$

kde  $c$  [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{deg}^{-1}$ ] je merné objemové teplo,  $\vartheta$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] je teplota,  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{deg}^{-1}$ ] je koeficient tepelnej vodivosti,  $\gamma$  [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ] je konduktivita izolantu,  $E$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] je intenzita elektrického poľa a  $t$  [s] je čas. [1, 2]

Poznáme tri dôvody tepelného prierazu, ktoré súvisia s dynamickou rovnováhou:

- Prvý z nich je že po priložení vysokého napätia nemôže dôjsť k vyššie spomínanej dynamickej rovnováhe a je to najčastejšia príčina tepelného prierazu.
- Druhý dôvod je že ustálenie dynamickej rovnováhy vyžaduje istý čas a pri izolante so zlým odvodom tepla alebo nízkou hodnotou bodu tavenia je tento čas dlhý a dochádza ku prierazu.
- Posledný dôvod nastáva pri nerovnomernom ohreve, kde sa pôvodne homogénne elektrické pole stáva nehomogénnym čo vedie opäť k prierazu.

Pri tepelnom prieraze je elektrická pevnosť závislá na teplote a na frekvencii priloženého napätia. Zvýšenie týchto dvoch veličín vedie ku klesaniu elektrickej pevnosti. [1, 2]

### Čistý elektrický prieraz

Pri bežnom napätí nedochádza k vysokým teplotám, takže nedochádza k splneniu podmienky na vznik tepelného prierazu v izolante. Začal sa objavovať iný druh prierazu a to čiste elektrický prieraz, ktorý nastáva ak nenastane tepelný prieraz. Čiste elektrický prieraz sa skúša na homogénnych vzorkách v homogénnom elektrickom poli za užitia rázového napätia. Trvá krátko cca  $10^{-7}$  sekúnd. Pri tomto type prierazu hrajú úlohu voľné elektróny. Táto informácia je len ako predpoklad pre zjednodušenie, keďže vieme že izolanty nemajú voľné nosiče nábojov. V skutočnosti žiaden reálny izolant nemá dokonalú štruktúru a následkom toho môže dôjsť k prechodu voľných elektrónov do vodivostného pásma. Vysvetlenie čiste elektrického prierazu z hľadiska existencie voľných elektrónov môžeme rozdeliť na 2 skupiny:

- V prvej predpokladáme malú koncentráciu elektrónov – ďalej je predpoklad vzájomných zrážok elektrónov menší ako zrážky elektrónu so štruktúrou izolantu, vďaka tomu môžeme zanedbať vplyv vzájomných zrážok elektrónov. K prierazu tak dôjde kvôli nárastu počtu voľných elektrónov  $\rightarrow$  nárast prúdu  $\rightarrow$  nárast energie  $\rightarrow$  zvýšenie teploty izolantu  $\rightarrow$  roztavenie izolantu alebo deštrukcia izolantu.
- V druhej uvažujeme veľkú koncentráciu elektrónov – nemôžeme zanedbať vplyv vzájomných zrážok elektrónov, pretože majú veľkú výmenu energie. Keď je výmena energie medzi elektrónmi väčšia ako výmena medzi elektrónmi a štruktúrou izolantu  $\rightarrow$  zväčšovanie elektrónovej teploty oproti teplote izolantu  $\rightarrow$  po prekročení rovnováhy medzi týmito teplotami  $\rightarrow$  nekontrolovateľný nárast teploty  $\rightarrow$  prieraz izolantu. [1, 2]

## Elektrochemický prieraz – starnutie izolantov

V materiáloch môžu vznikáť zmeny a to:

- Vratné, ktoré vznikajú pri málo intenzívnom pôsobení rôznych činiteľov. Vplyv týchto zmien sa dá ovplyvniť na akceptovateľnú hranicu.
- Nevratné, ktorých následky sú trvalé.

[1, 2]

Tieto poruchy (zmeny) znižujú elektrickú pevnosť izolantov a vedú k prierazom. Starnutie izolantu sa dostáva do popredia výskumov, keďže dochádza k prierazom izolantu aj keď vyriešime problém s tepelným prierazom a aj s elektrickým, kde zabezpečíme nízke napätie aby izolant vydržal. Pieraz dôsledkom starnutia nastáva po niekoľkých rokoch bez zjavných príčin. Za príčinu tohto uvažujeme čiastočné výboje v dutinkách kde je plyn v objeme pevného izolantu. Týmto dutinkám sa nevyhneme ani pri skvelej technologickej výrobe izolantu. Čiastočné výboje vznikajú podľa miesta ich výskytu: [1, 2]

- Vonkajšie – v plynných izolantoch v okolí elektród s malým povrchom alebo zakrivením.
- Vnútorne – v plynoch, ktoré sú obklopené pevným či kvapalným dielektrikom.
- Povrchové - v okolí elektród na rozhraní pevného a plynného dielektrika. [1, 2]

Výbojová činnosť má za následok dlhodobého zlyhávania izolantov pri nominálnych napätiach. Pri týchto výbojoch sa môžu prejaviť aj iné procesy:

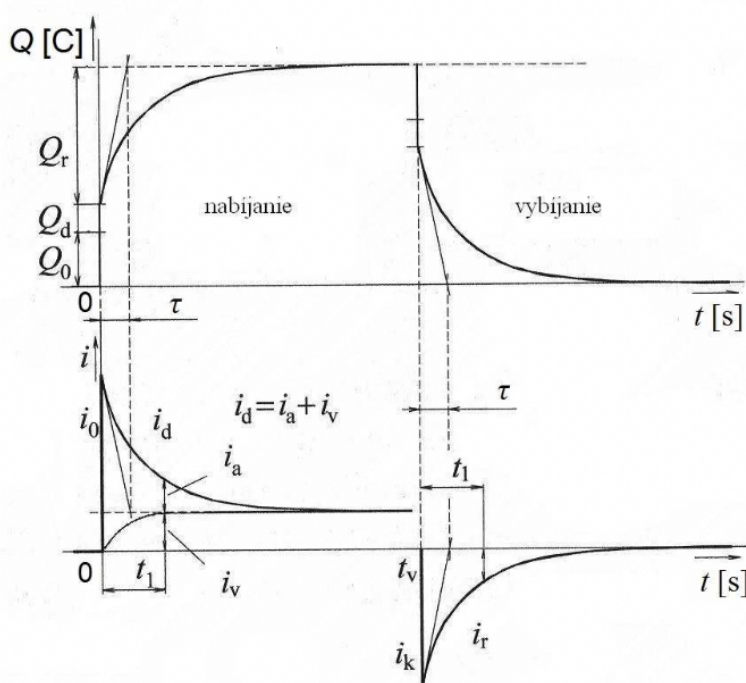
- Účinky žiarenia pri výboji.
- Chemické pôsobenie rozloženého plynu pri výboji.
- Vplyv iónov a elektrónov na povrch izolantu.[1, 2]

Pri každej látke sa však tieto procesy nemusia objaviť. Najväčší vplyv majú na organické izolanty. Na starnutie izolantu má podiel aj čistota povrchu izolantu keďže môže spôsobovať povrchové iskrenie a tým pádom zmenu v štruktúre izolantu. [1, 2]

## 2 Dielektrická absorpcia

Ak priložíme jednosmerné napätie na elektródy medzi ktorými sa nachádza dielektrikum, tak deje, ktoré prebieha v dielektriku a vnútorných obvodoch elektródového usporiadania, nazývame dielektrická absorpcia.[1]

Dielektrická absorpcia sú zložité deje, ktoré prebiehajú v dielektriku vloženom medzi elektródy kondenzátoru, pripojeného na jednosmerné napätie. Keďže sa jedná o jednosmerné napätie, tak dielektrikum nedokáže sledovať skokovú zmenu jednosmerného napätia, takže sa nenabije okamžite, ale až po určitej dobe. Rovnako sa bude s časom aj vybíjať. Toto oneskorenie spôsobuje dielektrická relaxácia, čo znamená, že dielektrikum kvôli pomalým polarizáciám má spomalenú odozvu na pôsobenie elektrického poľa. Tento jav je vidieť na obr.2.1 [1]



Obr. 2.1: Priebeh nabíjania a vybíjania kondenzátora v čase (Prevzaté z [1])

Elektrický náboj v kondenzátore s technickým dielektrikom po pripojení jednosmerného napätia rastie v čase postupne a to:[1]

1. Počiatočný okamžitý nárast náboja  $Q_0$  – nabije sa nám kapacita kondenzátoru  $C_0$ , je to kapacita kondenzátoru, ktorého dielektrikum by bolo vákuum.
2. Nárast náboja  $Q_d$  – vďaka rýchlym deformačným polarizáciám sa objaví na elektródach.

3. Nárast náboja  $Q_r(t)$  – vplyvom relaxačných polarizácií prichádza na elektródy no jeho čas je pomalší, takže je potrebné uvažovať s jeho časovým priebehom. Túto časovú zmenu tohto náboja je možné vyjadriť vzorcom:

$$Q_r(t) = Q_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2.1)$$

kde  $Q_s$  je veľkosť náboja  $Q_r(t)$  v ustálenom stave a  $\tau$  je časová konštanta alebo tiež relaxačná doba. Vďaka polarizácií sa na kondenzátore objavil celkový náboj  $Q_p = Q_d + Q_s$ . Pomer veľkosti náboja  $Q_s$  a napätia  $U$  sa nazýva absorpčná kapacita:

$$C_p = \frac{Q_s}{U}, \quad (2.2)$$

a vyjadruje prírastok kapacity na kondenzátore spôsobený vplyvom relaxačnej polarizácií.

4. Po ustálení polarizačných prechodov dielektrikom preteká iba vodivý prúd. Pri vybíjaní kondenzátora prebieha tento dej opačne s tým rozdielom, že veľkosť náboja sa blíži k nule.

Priebeh zmeny veľkosti náboja na kondenzátore sa prejaví zmenou premenného prúdu v čase, vidieť je to na obr.2.1 a má tieto zložky : [1]

- $i_0$  - nabíjací prúd – odpovedá nabíjaniu geometrickej kapacity a deformačným polarizáciám. Je daný odporom zdroja a prívodu  $R_0$  a veľkosťou priloženého napätia  $U$ . Po nabití geometrickej kapacity rýchlo klesá s časovou konštantou  $\tau_0 = R_0 \cdot C$ , kde  $C$  je kapacita kondenzátoru.
- $i_d$  – dobíjací prúd – po odznení dobíjacieho prúdu  $i_0$  preteká obvodom a má dve zložky: [1]

$$i_d(t) = i_a(t) + i_v(t), \quad (2.3)$$

kde  $i_a(t)$  – absorpčný prúd – je to prúd rovný súčtu polarizačných prúdov  $\sum i_p$  odpovedajúcich jednotlivým relaxačným polarizáciám prebiehajúcich v dielektriku. Poznáme 3 typy príčiny vzniku tohto prúdu :[1]

- polarizácia silne viazaných nosičov náboja v elektrickom poli
- hromadenie voľných nosičov náboja na rozhraní nehomogenita
- vznik priestorového náboja v blízkosti elektród

Absorpčný prúd klesá postupne k nule s časom, takže je časovo závislý. Rýchlosť tohto poklesu je daná štruktúrou a stavom danej látky. Medzi nábojom  $Q_r(t)$  a absorpčným prúdom  $i_a(t)$  platí nasledovný vzťah: [1]

$$Q_r(t) = \int_0^t i_a dt, \quad (2.4)$$

dosadením do vzťahu s užitím vzťahu 1 tak dostávame:

$$Q_r(t) = \int_0^t dt = Q_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2.5)$$



kde  $i_v(t)$  – vodivý prúd – k jeho ustálenej hodnote sa asymptoticky blíži hodnota dobíjacieho prúdu  $i_d$ . Tento prúd je časovo nezávislý a pri neporušených izolantoch je jeho hodnota veľmi malá. Pri zvlhnutých izolantoch sa uplatňuje iónová vodivosť a uvažujeme časovú závislosť vodivého prúdu. [1]

V čase  $t_v$  dôjde k odpojeniu napätia súčasne so skratom na elektródach. Vybijanie kondenzátoru s v obvode prejaví prechodom premenlivého prúdu za čas. Tento premenlivý prúd závislý na čase je tvorený 2 zložkami :[1]

- $i_k$  – vybijací prúd – v okamžiku vypnutia tento prúd rýchlo zaniká.
- $i_r(t)$  – resorpčný prúd – závisí na čase a asymptoticky sa blíži k nule.

Ak by v dielektriku prebiehal iba jeden typ relaxačnej polarizácie s jednou relaxačnou dobou, mohli by sme povedať, že priebeh absorpčného prúdu  $i_a(t)$  v čase by bol presne exponenciálny. Potom by platil nasledujúci vzťah: [1]

$$i_a(t) = U \cdot G \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.6)$$

kde  $G$  je vodivosť sústavy v čase  $t=0$  a  $t$  je relaxačná doba príslušnej polarizácie.

Keďže technické dielektrikum obsahuje viac zložiek rôznej štruktúry a rôznych relaxačných polarizácií nebude priebeh absorpčného prúdu exponenciálny. Bude klesať pomalšie a integrál tohto prúdu vieme nahradiť tzv. Curiovou funkciou: [1]

$$i_a(t) = U \cdot G \cdot e^{-n}, \quad (2.7)$$

kde  $n$  je konštanta, ktorej hodnota sa zisťuje experimentálne.[1]

Využitie časovej závislosti sa uplatňuje pri zisťovaní stavu izolácie elektrických zariadení. Zmeny stavu a štruktúry dielektrík zanechávajú presne takýto priebeh absorpčného prúdu. Ten nám vyjadruje aktuálny stav daného elektrika na základe strmosti priebehu.

Meranie izolácie pomocou merania dielektrickej absorpcie znamená, že pracujeme s jednosmerným napätím. To znamená, že sa budeme venovať diagnostickým metódam uvedených v kapitole 3.2, ktoré sa merajú práve pomocou jednosmerného napätia, no najprv je potrebné uviesť určité parametre dielektrík.

## 3 Diagnostika pomocou merania dielektrickej absorpcie

Využitie časovej závislosti (absorpčných a resorpčných charakteristík) sa uplatňuje pri zisťovaní stavu izolácie elektrických zariadení, keďže tieto charakteristiky majú výpovednú hodnotu o priebehu polarizačných javov v danom skúmanom dielektriku. Zmeny polarizácií určitým spôsobom odzrkadľujú zmeny stavu a štruktúry dielektrika tzn., že zmeny absorpčného a resorpčného prúdu je možné využiť v diagnostike pre izolačný materiál. Na základe toho dokážeme určiť navlhnutie, znečistenie alebo degradáciu materiálu. V praxi to znamená určiť nasledovné parametre:

### 3.1 Hľadané parametre

#### 3.1.1 Izolačný odpor

Je základným ukazateľnom stavu izolačného systému a je silne závislý na stupni navlhnutia dielektrika a na teplote pri ktorej sme merali. Definujeme ho ako odpor za špecifikovaných podmienok medzi dvoma vodivými časťami oddelenými izolačným materiálom. Izolačný odpor zahŕňa časť objemovej a povrchovej rezistivity s prihliadnutím na geometrické rozmery skúšaných vzoriek. [6]

#### 3.1.2 Objemová rezistivita

Objemová rezistivita je definovaná ako „*pomer intenzity jednosmerného elektrického poľa a prúdovej hustoty vnútri izolačného média pri stanovenom čase a priloženom napätí*“. [6]

#### 3.1.3 Povrchová rezistivita

Povrchová rezistivita je definovaná ako „*povrchový odpor na jednotku plochy*“ [6] Pre porovnanie izolačných odporov rôznych dielektrík sa zaviedli pojmy ako:

#### 3.1.4 Povrchový odpor

Povrchový odpor je definovaný ako „*Povrchový odpor je časť izolačného odporu, ktorý vzniká kvôli vodivosti na povrchu*“. [6]

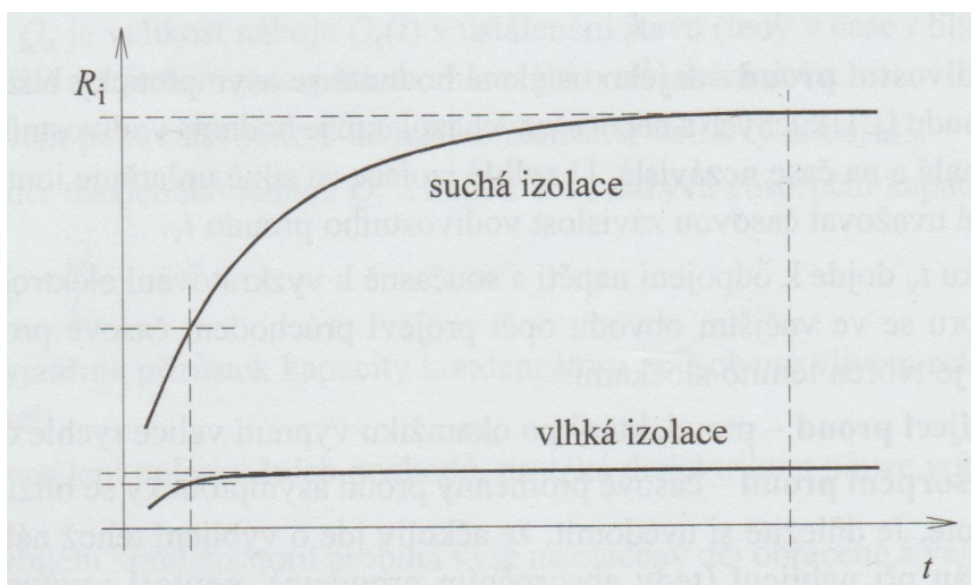
### 3.1.5 Objemový odpor

Objemový odpor je definovaný ako „*Objemový odpor je podiel jednosmerného napätia medzi dvoma elektródami v kontakte s izolačným médiom a prechádzajúceho prúdu pri stanovovej dobe priloženého napätia*“.[6]

Na základe týchto dvoch pojmov, ktoré sú vzťahované k rozmerom vzoriek môžeme dielektriká medzi sebou porovnávať na základe izolačného odporu.

### 3.1.6 Polarizačný index

Polarizačný index je podiel dobíjacieho prúdu  $i_d$  v 15 a v 60 sekunde po pripojení napätia. Tento index dosahuje pri kvalitných izolantoch hodnôt v rozmedzí od 3-6. Pri týchto dobrých a suchých izolantoch je vodivý prúd  $i_v$  oveľa menší ako absorpčný prúd, čiže polarizačný index bude väčší ako 1. No pri vlhkých alebo inak poškodených izolantoch je vodivý prúd veľký a polarizačný index  $p_i$  sa blíži k 1. Tieto rozdiely suchého a mokrého izolantu je vidieť na obr.2.1. [1]



Obr. 3.1: Rozdiely izolačného odporu suchého a vlhkého izolantu v závislosti na čase (Prevzaté z [1])

Polarizačný index  $p_i$  je definovaný ako :[1]

$$p_i = \frac{i_d(15)}{i_d(60)} = \frac{R_i(60)}{R_i(15)}, \quad (3.1)$$

kde  $i_d(15)$  a  $i_d(60)$  sú hodnoty dobíjacieho prúdu v 15. a 60. sekunde od pripojenia napätia, a  $R_i(15)$  a  $R_i(60)$  sú príslušné hodnoty izolačného odporu. Po dosadení do

vzťahu (8) podľa (3), tak dostaneme výsledný vzťah pre polarizačný index  $p_i$  :[1]

$$p_i = \frac{i_a(15) + i_v(15)}{i_a(60) + i_v(60)}, \quad (3.2)$$

podobne sa tak dajú odvodiť vzťahy aj napr. pre 5 minútový polarizačný index, kde dosadzujeme za dobíjací prúd hodnotu v prvej a piatej minúte. Pri izolačných systémoch elektrických strojov je tento index neodmysliteľnou súčasťou. [1]

Okrem minútového testu sa v praxi používa aj 10 minútový, ktorý je definovaný rovnako ako minútový ale odčítame v časoch prvej a desiatej minúty. Tento 10 minútový polarizačný index sa využíva pri diagnostike elektrických strojov. Pre získanie stavu izolácie na základe  $p_i$  sa riadime týmito hodnotami:

- $p_i < 1,5$  – znečistená, stará alebo vlhka izolácia
- $p_i$  1,25 až 2,5 – možné znečistenie alebo navlhnutie
- $p_i$  2,5 až 4 – čistá a sucha izolácia
- $p_i > 4$  – veľmi čistá a veľmi sucha izolácia

Meranie polarizačného indexu sa vykonáva pomocou jednosmerného vysokonapäťového zdroja s dobrou reguláciou a citlivým ampérmetrom meracieho prúdu menšie než  $nA$ . Na meranie má vplyv vlhkosť, takže sa meranie vykonáva pri teplote nad rosným bodom.

### 3.1.7 Koeficient dielektrické absorpcie

Výrobcovia tento koeficient značia ako DAR ( Dielectric Absorption ratio). Tento koeficient sa získava pri odčítaní odporu pri 60s a pri odčítaní odporu pri 30s, kde vzťah pre tento koeficient vyzerá nasledovne :

$$DAR = \frac{R_i(60s)}{R_i(30s)} \quad (3.3)$$

Je to podobne ako zisťovanie polarizačného indexu akurát doba odčítania odporov je skrátená. Pre získanie stavu izolácie na základe DAR sa riadime týmito hodnotami:

- $DAR < 1,25$  – silne znečistená izolácia, stará alebo zvlhla izolácia
- $DAR$  1,25 až 1,4 – čistá a sucha izolácia
- $DAR > 1,4$  – veľmi čistá a veľmi sucha izolácia

Meranie tohto koeficientu je možné prenosnými prístrojmi alebo metódami ako pri meraní izolačného, vnútorného a povrchového odporu s rozdielom odčítania pri časoch, ktoré sme si uviedli vyššie.

### 3.1.8 Permittivita

Permittivita je fyzikálna veličina, ktorú v minulosti označovali aj ako dielektrická konštanta. Je definovaná ako „**elektrická indukcia delená intenzitou elektrického poľa**“. Udáva sa najčastejšie ako súčin relatívnej permitivity a permitivity vákua: [6]

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (3.4)$$

#### Relatívna permitivita

Je definovaná ako „**podiel permitivity a permitivity vákua**“. Za určitých podmienok je relatívna permitivita izolačného materiálu  $\varepsilon_r$  definovaná ako:

$$\varepsilon_r = \frac{C_X}{C_0}, \quad (3.5)$$

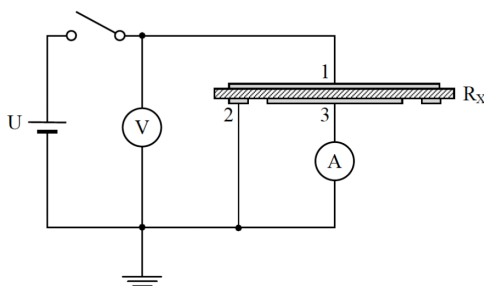
kde kapacita  $C_X$  skúšobného vzorku (kondenzátoru) je priestor medzi obidvoma elektródami vyplnený izolačným materiálom a kapacita  $C_0$  rovnakej konfigurácií vo vákuu. [6]

## 3.2 Diagnostické metódy

### 3.2.1 Volt-ampérová metóda

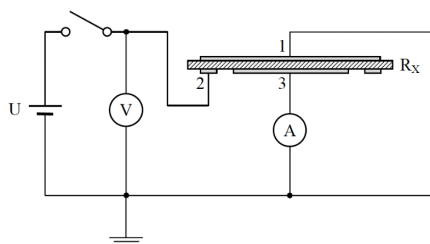
Pri tejto metóde využívame jednosmerné napätie k prvku a odčítame prúd, ktorý ním prechádza. Jedná sa tak o priamu a veľmi rýchlu metódu. Touto metódou je možné zistiť:

Vnútny odpor



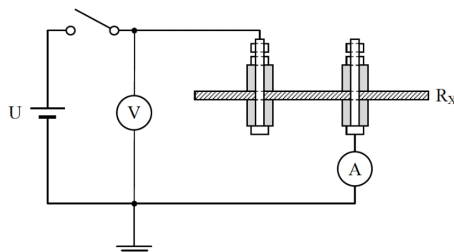
Obr. 3.2: Zapojenie pre meranie vnútorného odporu (Prevzaté z [1])

Povrchový odpor



Obr. 3.3: Zapojenie pre meranie povrchového odporu (Prevzaté z [1])

Izolačný odpor



Obr. 3.4: Zapojenie pre meranie izolačného odporu (Prevzaté z [1])

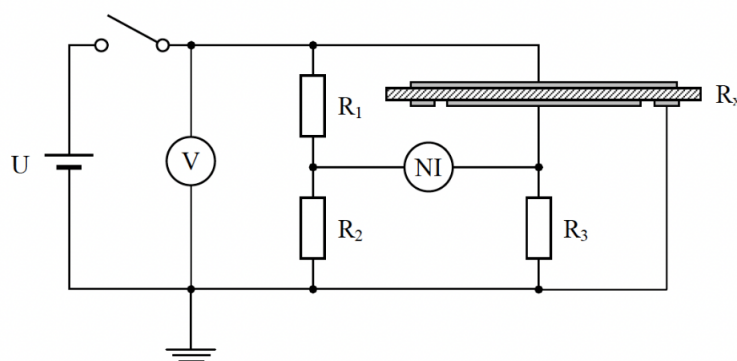
Prúd odčítame až po chvíli (po odznení nabíjacej zložky prúdu). Pri kvalitných materiáloch však táto zložka môže odznievať aj niekoľko a preto v praxi odčítame po 1 minúte. Na základe priloženého napätia a pretekajúceho prúdu tak vieme určiť odpor  $R_x$ : [1, 1]

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (3.6)$$

Táto metóda je najjednoduchšia a preto ju využívajú mobilne meracie prístroje na diagnostiku. [1]

### 3.2.2 Metóda Wheatstonova mostíku

Vychádza zo známeho princípu Wheatstonova mostíku. Oproti metóde V-A je táto metóda porovnávacia. Porovnáva neznámy odpor so známym referenčným odporom, ktorý má veľkú hodnotu. Meraný objekt sa zapojí do jednej z vetvy mostíka, ako je vidieť na obr.3.5. Do ďalších vetiev sú zapojené známe hodnoty odporu. [1]



Obr. 3.5: Zapojenie Wheatstonova mostíku na meranie vnútorného odporu (Prevzaté z [1])

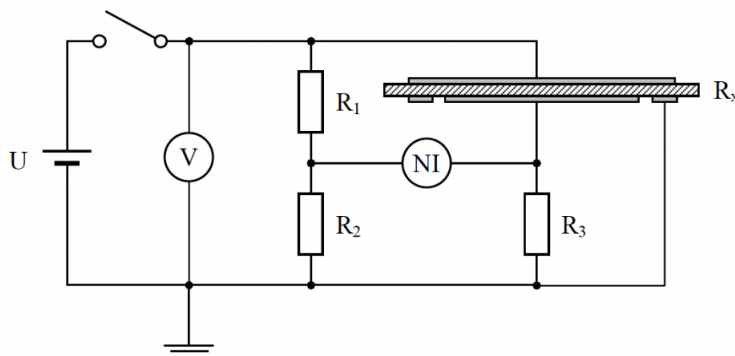
Odpor  $R_1$  a  $R_2$  slúžia na vyrovňovanie kde  $R_1$  sa mení v dekádach a  $R_2$  na jemné vyrovňovanie. Odpor  $R_3$  sa nemení. Ak je mostík vyvážený platí nasledujúca rovnica:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (3.7)$$

Táto metóda nie je vhodná pre meranie kvalitných izolantov keďže táto metóda je dostatočne presná pri 100 V a s odpormi do  $10^{13}$  až  $10^{14}$ . [1]

### 3.2.3 Kompenzačná metóda

Zapájame ju podľa obr.3.6 a obsahuje kompenzačný a merný zdroj napätia. Do časti s merným zdrojom dávame materiál a meriame na ňom neznámy odpor  $R_X$ . Do časti s kompenzačným zdrojom dávame odporový normál  $R_N$ .



Obr. 3.6: Zapojenie pri meraní kompenzačnej metódy (Prevzaté z [1])

Princíp je založený na kompenzácií úbytku napätia na odpore  $R_N$  pomocným napätím  $U_K$ . Pri kompenzácií nebude pretekať prúd a bude splnená podmienka, na základe ktorej vieme vyjadriť vzťah pre odpor  $R_X$ :

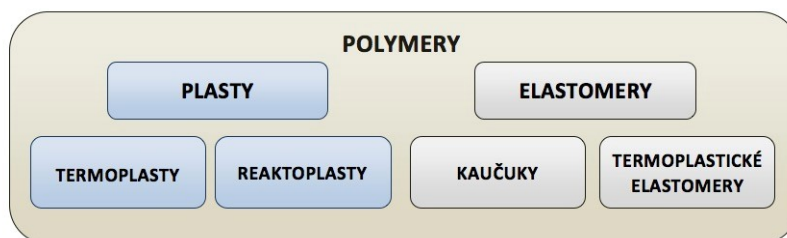
$$\frac{U_M}{R_X} = \frac{U_K}{R_N} \rightarrow R_X = R_N \cdot \frac{U_M}{U_K}, \quad (3.8)$$

kde  $U_M$  [V] je merné napätie a  $U_K$  [V] je napätie kompenzačné merané voltmetrom.  
[1]



## 4 Polyméry

Medzi základné rozdelenie polymérov patria dve skupiny: plasty a elastoméry. Z ďalšieho delenia plastov nás budú zaujímať termoplasty a reaktoplasty. Cele rozdelenie polymérov je vidieť na obr.4.1. [22]



Obr. 4.1: Rozdelenie polymérov (Prevzaté z [22])

Polyméry radíme medzi veľmi dobré elektrické izolanty, táto vlastnosť je široko využívaná v izoláciách kabelov a vodičov. Parametre izolačných vlastností reprezentuje elektrická pevnosť, merný vnútorný a povrchový odpor ( $\rho_v$  a  $\rho_p$ ). Parametre dielektrických vlastností reprezentuje relatívna permitivita ( $\epsilon_r$ ) a stratový činiteľ ( $\tan \delta$ ). Tieto parametre sme si definovali v kapitole 3.1), elektrická pevnosť (tá je popísaná v kapitole 1.6). Typické hodnoty elektrických vlastností polymérov sú na obr.4.2 [23]

	Polymer	Zkratka	$\rho_v$ [ $\Omega \text{ cm}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]	*[kV/mm]	$\epsilon_r^{**}$ [-]	$\text{tg} \delta \cdot 10^{-4}$ [-]
Termoplast	Nízkohustotný polyetylen	PE-LD	$>10^{17}$	$10^{14}$	42	2,3	1,5
	Vysokohustotný polyetylen	PE-HD	$>10^{17}$	$10^{14}$	38	2,4	2,4
	Zesíťovaný polyetylen	PE-X	$>10^{17}$	$10^{14}$	40	2,4	7,0
	Polypropylen	PP	$>10^{17}$	$10^{13}$	50 + 65	2,3	$< 4,0$
	Standardný polystyren	PS-GP	$>10^{16}$	$>10^{13}$	30 + 70	2,5	1,0 + 4,0
	Akrylonitril-butadien-styren	ABS	$>10^{15}$	$>10^{13}$	35 + 50	2,5 + 5,0	30 + 80
	Polyamid 6 suchý	PA-6	$10^{14}$	$10^{12}$	65	4,3	70 + 80
	Polyamid 6 navlhý		$10^{12}$	$10^{10}$	45	3,8	2000
	Nemäkčený polyvinylchlorid	PVC-U	$>10^{15}$	$10^{13}$	35 + 50	3,5	110
	Mäkčený polyvinylchlorid	PVC-P	$>10^{11}$	$10^{11}$	30 + 40	4,0 + 8,0	800
	Polyethylentereftalát	PET	$10^{16}$	$10^{16}$	42	4,0	20
	Polytetrafluorethylen	PTFE	$>10^{18}$	$10^{17}$	48	$< 2,1$	$< 2,0$
Reakto-plast	Fenoplasty		$10^{11}$	$>10^8$	30 + 40	6,0	1000
	Aminoplasty		$10^{11}$	$>10^8$	30	8,0 + 9,0	400 + 600
	Epoxidové pryskyřice	EP	$>10^{14}$	$>10^{12}$	20 + 40	5,0	100
	Silikonové kaučuky	Q	$10^{15}$	$10^{13}$	20	4,0	$> 200$

Poznámka: \*elektrická (průrazová) pevnost; \*\* frekvence 50 Hz

Obr. 4.2: Typické hodnoty elektrických vlastností polymérov (Prevzaté z [23])

Ďalej si popíšeme hlavných predstaviteľov termoplastov, reaktoplastov a elastomerov:

## **4.1 Termoplasty**

### **4.1.1 Polyetylén (PE)**

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: vďaka nepochárnosti molekúl má výborné elektroizolačné vlastnosti. Použitie: výroba káblov (slúži ako izolácia), silové vodiče, výroba krytov a konektorov, izolačné a technické fólie, používa sa aj vo vysokofrekvenčnej technike. [24, 25]

Polyetylén (PE):

- je jeden z najjednoduchších termoplastov
- jeho základnou štruktúrou je uhľovodíkový reťazec
- je vyrábaný rôznymi spôsobmi a tvorí širokú paletu produktov s rozličnými vlastnosťami
- teplota tavenia je od 105°C až 136°C.

### **4.1.2 Polyimidy (PI)**

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: vďaka odolávaniu vysokým teplotám sa skvelo hodia ako izolácia elektrických motorov aj pri teplotách okolo 250°C. Použitie: izolácia elektrických točivých strojov, izolácia cievok, vodičov, drážok a izolácia vývodov motorov a generátorov, v transformátoroch na izoláciu závitov, vrstiev a prívodov transformátorov. [24, 25]

Polyimidy (PI):

- majú skvelú tepelnú stabilitu, tzn. že sú vysoko tepelne odolné plasty
- výroba je technicky náročná a problematická

### **4.1.3 Polyamidy (PA)**

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: dobré dielektrické vlastnosti v suchom stave, majú dobrú odolnosť voči oderom a dobré mechanické vlastnosti. Použitie: káblová technika (ako ochranný plášť), výroba krytov a častí motorov. [26, 27]

Polyamidy (PA):

- sú lineárne polyméry
- vyrábajú sa pomocou polykondenzácie alebo polymerácie

#### 4.1.4 Polyvinylchlorid (PVC)

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: chlórové atómy sú v PVC veľmi polárne a sú v polymérnom reťazci viazané relatívne pevne, z čoho vyplývajú dobre elektrické vlastnosti PVC ako izolantu. Použitie: nemäkčený PVC sa používa na rôzne konštrukčné prvky napr. súčasti ventilov a armatúr, krytov a rozvodných krabíc. Mäkčené PVC sa používajú v káblovej technike (prevažne na výrobu izolácie káblov do 30 kV). [24, 25]

Polyvinylchlorid (PVC):

- jeden z najdôležitejších termoplastov
- vyrába sa niekoľkými spôsobmi, napr. syntézou, kombinovaným spôsobom, emulznou polymeráciou atď.

### 4.2 Reaktoplasty

#### 4.2.1 Fenoplasty (PF)

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: teplotne odolné do 100°C. Majú nízku tepelnú rozťažnosť. Majú dobré elektroizolačné vlastnosti ale dielektrické straty majú vysoké. Použitie: výroba vypínačov a ističov, kryty, kostry cievok, svorkovnice, základné dosky a ďalšie. [24, 25]

Fenoplasty (PF):

- pri tomto type plastu dochádza pôsobením tepla k chemickému vytvrdeniu a látka prechádza nevratne do netaviteľného a rozpustného stavu.

#### 4.2.2 Aminoplasty

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: majú dobré mechanické vlastnosti a odolávajú dobre taktiež UV žiareniu. Použitie: výroba patíc žiaroviek, zásuviek, atď. [24, 25]

Aminoplasty:

- sú tvorené kondenzátmi formaldehydu a látkami obsahujúce aminové alebo amidové skupiny.

### 4.2.3 Epoxidy (EP)

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: majú dobrú tepelnú odolnosť, kde pri trvalom zaťažení zvládajú teploty až 160°C. Majú vysokú hodnoty povrchového odporu a elektrickej pevnosti. Permittivita a stratový činiteľ je frekvenčne závislý. Použitie: k lepeniu súčastí elektrických strojov. [24, 25]

Epoxidy (EP):

- dodávajú sa vo forme viskózných sirupovitých kvapalinách alebo v tuhom stave

### 4.2.4 Silikóny

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: majú vynikajúcu odolnosť voči teplu a dlhodobo znášajú teploty do 200°C (krátkodobo až 350°C). Majú vysokú elektrickú pevnosť a dielektrické vlastnosti sa menia s teplotou iba minimálne. Použitie: silikónové oleje sa používajú do transformátorov, v kondenzátoroch, izolácia vodičov používané na výrobu elektrických strojov alebo transformátorov . [24, 25]

Silikóny:

- vyrábajú sa na základe dvoch metód (Griagmardova syntéza a metóda priamej syntézy)

## 4.3 Elastomery

### 4.3.1 Butadien-styrenový kaučuk

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: má dobrú mechanickú odolnosť. Je to elastický materiál. Použitie: pri výrobe káblov. [24, 25]

Elastomery:

- pod kaučukmi sa rozumejú polyméry, ktoré môžu byť prevedené fyzikálnym alebo chemickým zasycovaním v elastomery.

### 4.3.2 Silikónové kaučuky

Vlastnosti a využitie v elektrotechnike: majú výbornú tepelnú odolnosť (dlhodobo odolávajú 200°C a krátkodobo až 350°C). Majú dobré tlmiace vlastnosti (k tlmeniu vibrácií pri vysokých aj nízkych teplotách). Použitie: v elektrických točivých strojoch, v termostatoch, pri výrobe káblov.[24, 25]

Silikónové kaučuky:

- delia sa na typy vulkanizované za tepla a silikónové kaučuky za teploty miestnosti.

## 4.4 Možnosti merania pomocou DAR

Ako sme si uvideli v kapitole 3.2 dielektrické materiály je možné merať na základe uvedených diagnostických metód. Na tieto metódy sú potrebné prístroje, na ktoré sú kladené určité požiadavky, aby bolo meranie presné a aby malo výpovednú hodnotu o stave izolácie. Nasledujúce zariadenia kombinujú prístroje uvedené v zapojeniach pri meraní dielektrickej absorpcie akými sú: voltmeter, megaohmmeter, ampérmeter a jednosmerný zdroj. Zariadenia uvedené nižšie slúžia pre meranie pevnej izolácie ako sú z polymérov napríklad: polypropylén, polyetylén, polyvinylchlorid a ďalšie. Samozrejme je možné merať aj kvapalnú dielektriká pomocou merania dielektrickej absorpcie za pomoci uvedeného laboratórneho zariadenia. Zariadenia pre meranie dielektrickej absorpcie a uvedených hľadaných parametroch môžeme rozdeliť do dvoch skupín:

### 4.4.1 Prenosné zariadenia

Tieto zariadenia sú určené pre operatívne meranie v prevádzke. Na nasledujúcich obrázkoch (obr.4.3) sú uvedené nejaké typy týchto zariadení. Tieto prístroje majú v sebe zabudované všetko potrebné pre diagnostické merania izolácií. Tieto prístroje dokážu merať či už izolačný odpor káblov, motorov, transformátorov a ďalších elektrických zariadení. Hodnoty, ktoré namerajú aj sami spracujú a na display ukážu už výslednú hodnotu potrebného parametru. Tieto zariadenia majú aj integrovaný zdroj jednosmerného napätia, ktorého napätie je možné rádovo meniť od niekoľko desiatok voltov až po jednotky kV. Medzi základné meracie parametre týchto uvedených prístrojoch patrí:

- Meranie izolačného odporu
- Meranie polarizačného indexu
- Meranie koeficientu dielektrickej absorpcie DAR

Zariadenia na obrázku 4.3 sa líšia v napäťovom rozsahu, ktorý je možné nastaviť a taktiež v meracom rozsahu izolačného odporu. Tieto prístroje však nie sú tak presné ako laboratórne zariadenia, ktoré majú v laboratóriách ideálne podmienky a kde sa testujú účelovo pripravené vzorky o určitých rozmeroch.



Merač izolačného odporu Kyoritsu KEW  
3025A



Merač izolačného odporu UNI-T  
UT505A



Merač izolačného odporu MIC-2501



Merač izolačného odporu MIT1025

Obr. 4.3: Prenosné meracie zariadenia (Prevzaté z [1])

#### 4.4.2 Laboratórne zariadenie

Ako laboratórne zariadenie, ktoré dokáže merať hľadané parametre dielektrík si uvedieme zariadenie s názvom Tettex 2830/2831 (obr.4.4) od výrobcu Haefely. K tomuto zariadeniu je možné pripojiť bunku na meranie pevných dielektrík s označením Tettex 2914, a bunku pre meranie kvapalných dielektrík s označením Tettex 2903. Zariadenie Tettex 2830/2831 je určené pre meranie izolačných materiálov s veľmi nízkymi dielektrickými stratami. Toto zariadenie pracuje na princípe kombinovaného mostíkového vektora a je schopné analyzovať kapacitný a stratový činiteľ  $\tan \delta$  ako aj jednosmerný odpor s vynikajúcou stabilitou a presnosťou. Obsluha si môže vybrať medzi manuálnym alebo automatickým režimom, ktorý podporuje úplne automatizované testovacie sekvencie podľa noriem. Zariadenie taktiež dokáže dopočítavať až 13 rôznych parametrov meraného dielektrika. [31]



Obr. 4.4: Laboratórne zariadenie Tettex 2830/2831 (Prevzaté z [31])

#### 4.4.3 Bunka pre meranie pevných dielektrík Tettex 2914

Toto zariadenie je zobrazené na obr.4.5. Slúži na meranie pevných dielektrík a v podstate sa jedná o vyhrievaný doskový kondenzátor, v ktorom je možné merať dielektrikum. Meracia elektróda je umiestnená na posuvnej podpere, ktorou je možné vertikálne posúvať. Okolo nej je ochranný prstenec, ktorý znižuje vplyv čiastočných kapacít. Druhá vysokonapäťová elektróda je umiestnená v podstavci. Táto bunka má aj možnosť pomocou prípojky odsáť vzduch. [32]



Obr. 4.5: Bunka pre meranie pevných dielektrík Tettex 2914 (Prevzaté z [32])

#### 4.4.4 Bunka pre meranie kvapalných dielektrík Tettex 2903

Toto zariadenie je zobrazené na obr.4.6. Slúži na meranie kvapalných dielektrík, bunka je usporiadaná ako valcový kondenzátor. Opäť ako pri Tettex 2914 má Tettex 2903 meraciu elektródu, ktorá je tienená aby sa zabránilo rozptylovým kapacitám. Táto meracia tienená elektróda je umiestnená vo vnútri a vysokonapäťová elektróda je vonkajšia obálka valcu. Rovnako ako pri Tettex 2914 je možné z bunky odčerpať vzduch a aj natlakovať požadovaným pracovným plynom. Bunka je hermeticky uzavretá pomocou tesniaceho krúžku.[33]



Obr. 4.6: Bunka pre meranie kvapalných dielektrík Tettex 2903 (Prevzaté z [33])

Meranie pomocou takéhoto laboratórneho zariadenia prebieha pod záštitou noriem. Pri meraní rezistivity pevných dielektrík tieto normy udávajú, že zdroj napätia by mal byť veľmi stabilný – zmena prúdu spôsobená zmenou napätia by mala byť voči meranému prúdu zanedbateľná. Pri meraní stratového činiteľa zas normy uvádzajú možnosť použiť doporučenú metódu, ktorú udáva výrobca (Tettex používa Schernigův mostík).



## 5 Diagnostické metódy vysokonapäťových zariadení

Voľba diagnostickej metódy závisí na určitých faktoroch a to na nároku na prerušenie dodávky elektrickej energie, bezpečnosti metódy s ohľadom na izolačný systém elektrického stroja a na tom, čo nám daná metóda povie o diagnostikovanom systéme. V dnešnej dobe sa kladie dôraz aj na ekonomické aspekty tejto problematiky. Z tohto hľadiska nám detekcia možných porúch pomôže predísť zvýšeným nákladom na opravu pred vznikom poruchy. Medzi kľúčové zariadenia elektroenergetickej sústavy patria transformátory, motory, zvodnice, káble a ďalšie.

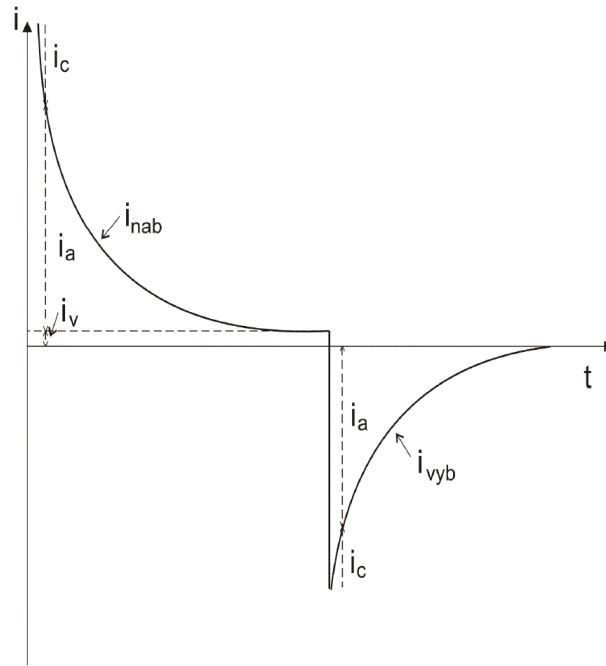
### 5.1 Transformátory

Najrizikovejšie miesto transformátora z pohľadu na jeho životnosť a funkčnosť je jeho izolačný systém. Väčšina porúch (cca 60%) boli tvorené defektami v izolačnom systéme. Z tejto hodnoty vyplýva, že diagnostika izolačného systému transformátora je veľmi opodstatnená. Na izolačný systém transformátora pôsobia degradačné činitele, ktoré spôsobujú starnutie, stratu kvality a požadovaných parametrov. Tieto procesy vedú k prierazu a havárii transformátora. Oprava takto poškodennej izolácie je finančne nákladná a preto sa snažíme odhaliť rozvíjajúce sa poruchy a na základe toho plánovať potrebnú údržbu. V tom nám pomáhajú diagnostické metódy, ktorých je veľmi veľa. Používajú sa chemické, mechanické, optické, tepelné a elektrické metódy. V tejto oblasti sa okrem tradičných metód na údržbu transformátora, akými sú pravidelné výmeny oleja a vykonávanie analýzy rozpustených plynov, vyvíjajú aj nové metódy. V minulosti sa používalo len meranie izolačného odporu a meranie prieražného napätia oleja. V súčasnosti je ich omnoho viac, napríklad: meranie kapacity, meranie dielektrických strát, meranie čiastkových výbojov, analýza frekvenčnej analýzy, stanovenie čísla kyslosti, meranie viskozity, stanovenie relatívnej permitivity a mnoho ďalších.[11, 12]

#### 5.1.1 Analýza nabíjacích a vybíjacích prúdov

Táto metóda je tiež známa pod názvom IRC analýza (z angl. Isothermal relaxation current) a slúži na zisťovanie vodivosti a vlhkosti izolačných materiálov v transformátore. Pri meraní je jednosmerné napätie použité pre určitý špecifický čas polarizácie. Na základe tohto času sa pulzujúci prúd ustáli na konštantnej hodnote, ktorá je závislá na vodivosti dielektrika. Po čase polarizácie sa odoberie napätie a dielektrikum sa vyskratuje cez ampérmeter. Vybíjací prúd preskočí do záporných hodnôt, ktoré

sa približujú nule. Na základe toho sa pridelí transformátoru model, ktorý reprezentuje hlavný izolačný systém a jeho dielektrické správanie. Parametre pre tento model je možné vypočítať z polarizačných charakteristík, ktoré získame meraním vzoriek materiálu s presne stanovenou vlhkosťou, geometriou izolácie a pozíciou vzoriek. Výsledkom tohto celého sú informácie o vlhkosti, stratového uhla, vodivosti oleja, polarizačného indexu izolačného systému. Priebeh nabíjacieho a vybíjacieho prúdu je možné vidieť na obr.5.1 [11, 28]



Obr. 5.1: Časový priebeh nabíjacieho a vybíjacieho prúdu (Prevzaté z [28])

Pre nabíjací prúd  $i_{nab}$ , ktorý preteká dielektrikom po pripojení jednosmerného napätia platí:

$i_n(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v$ , kde  $i_c(t)$  je kapacitná zložka prúdu (klesá od okamžiku pripojenia napätia),  $i_a(t)$  je absorpčná zložka prúdu (súvisí s transportom viazaných nábojov medzi vrstvami nehomogénnej izolácie, ktorá je s časom klesajúca) a  $i_v$  je vodivostná zložka prúdu. [11, 28]

### 5.1.2 Meranie izolačného odporu

Je to najstaršia a najjednoduchšia metóda na kontrolovanie izolačného stavu izolácie. Princíp spočíva v meraní odporu izolácie po pripojení jednosmerného napätia za určitý čas. Meriame teda pri jednosmernom napätí v hladinách od 500 V do 2500 V v závislosti od napäťovej hladiny transformátora (pre transformátor do hladiny

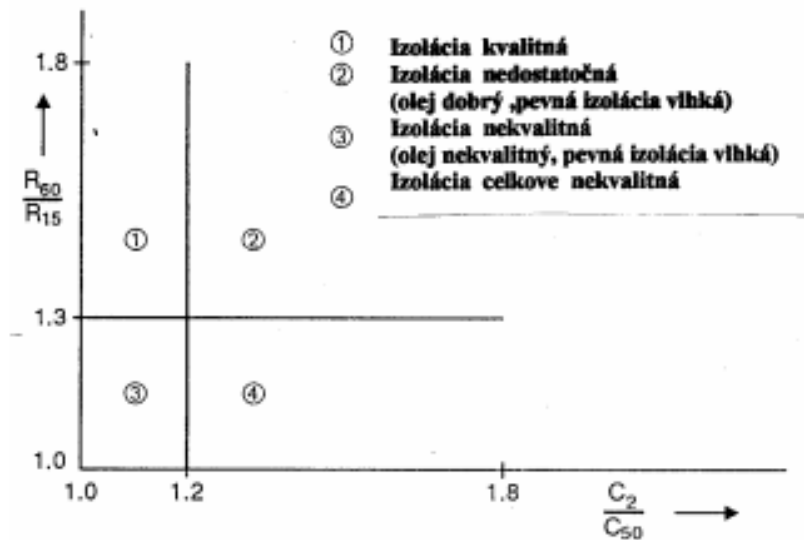
1 kV stačí nastaviť 500 V). Izolačný odpor sa meria za studena po dobu 1 minúty, kde odpor odčítame po 15 a 60 sekundách. Jeho hodnota meraná pri teplote  $20 \pm 5$  °C musí byť :  $R_{iz} \geq U$  , kde  $R_{iz}$  [M $\Omega$ ] je izolačný odpor a  $U$  [kV] je menovité napätie vinutia. Doplňujúcim kritériom kvality izolácie je polarizačný index  $p_i$  (činiteľ absorpcie) , ktorý sme si vysvetlili v kapitole X. Polarizačný index nových transformátorov sa pohybuje od 1,3 až po 1,7-1,8 a vyššie, v závislosti kvality izolačného systému. Výhodou polarizačného indexu voči izolačnému odporu je, že pri meraní nie je potrebné tak presne dodržiavať určitú teplotu ako pri meraní izolačného odporu. Pred meraním je nutné aby izolácia transformátora bola vybitá (min. 2 minúty pred začatím merania), t.j. bez napätia (na nejaký čas spojiť vinutie s kostrou), pri meraní je potrebné odpojiť všetky ostatné zariadenia a po meraní opäť izoláciu vybiť. Pre toto meranie sa využíva špeciálny prístroj tzv. megaohmmeter. Tie poskytujú chybu pri meraní izolačného odporu nepresahujúceho 15 %, napr. megaohmmetre typu F-4102, F-4108, ES0202 / 2 spĺňajú tieto požiadavky. [13, 14]

Pre meranie na vysokonapäťovom olejovom transformátore môžeme využiť napríklad: The Insulation Expert – UNILAP ISO 5 kV – generuje vysoké jednosmerné napätie s konštantnou veľkosťou od 1 kV do 5 kV, čo umožní zmenšiť chybu merania. Prístrojové funkcie: stanovenie indexu polarizácie a dielektrického absorpčného pomeru, polarizačný index s voľne programovateľnými časmi vzorkovania, meranie miestneho izolačného odporu, postupné zvyšovanie meracieho napätia na izoláciu alebo skúšky na potlačenie s voliteľným štartom a ďalšie...

Meranie s takýmto prístrojom na transformátore prebieha pri rôznych kombináciách zapojenia meraných vinutí. Vývody fáz na primárnej strane sa spoja a vytvoria VN elektródu to iste na sekundárnej strane a vznikne NN elektróda. Následne sa meria odpor medzi: VN a NN elektródou, VN elektródou a uzemnenou nádobou, NN elektródou a uzemnenou nádobou, VN a NN elektródou spojenou s uzemnenou nádobou, NN a VN elektródou spojenou s uzemnenou nádobou. [29]

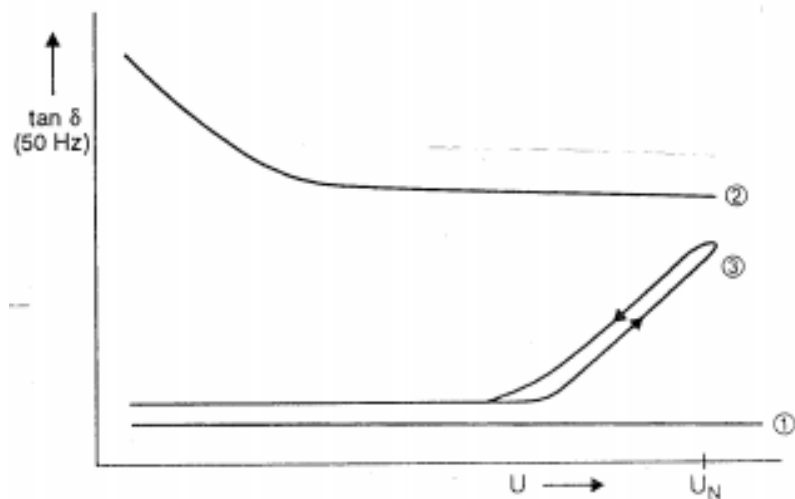
### 5.1.3 Meranie kapacity a stratového činiteľa izolácie

Pri meraní kapacity  $C$  a stratového činiteľa  $\tan \delta$  sa používa merací mostík (napríklad od firmy Tettex-typ 2818). Tento typ mostíku sa pre meranie kapacity a stratového činiteľa dá využiť na akomkoľvek transformátore, točivom stroji alebo pre meranie na kábloch či priechodkách. Pri tomto meraní sú vinutia jednotlivých fáz spojené rovnako ako pri meraní izolačného odporu. Meranie prebieha opäť na transformátore, ktorý je odpojený od okolitých zariadení a má teplotu 20°C. Súvis medzi kapacitou meraného objektu a izolačným odporom je vidieť na obr.5.2, kde závislosti týchto dvoch veličín povedia v akom stave je daná izolácia. Pomer kapacity  $C_2$  značí pomer kapacity pri frekvencii 2 Hz a  $C_{50}$  pri frekvencii 50 Hz. [15, 29, 30]



Obr. 5.2: Faktory charakterizujúce pomer meraných veličín (Prevzaté z [30])

Stratový činiteľ je možné merať napríklad na Scheringovom mostíku kde sa meria závislosť frekvencie od skúšobného napätia a výsledky je možné vidieť na obr.5.3, kde krivka s označením 1 značí kvalitnú izoláciu, ktorá je nenavlhnutá, tzn. že je stratový činiteľ nízky a nezávislý od skúšobného napätia. Krivka s číslom 2 značí navlhnutú izoláciu s nestabilnou hodnotou strát. Krivka 3 značí suchú kvalitnú izoláciu. [30]

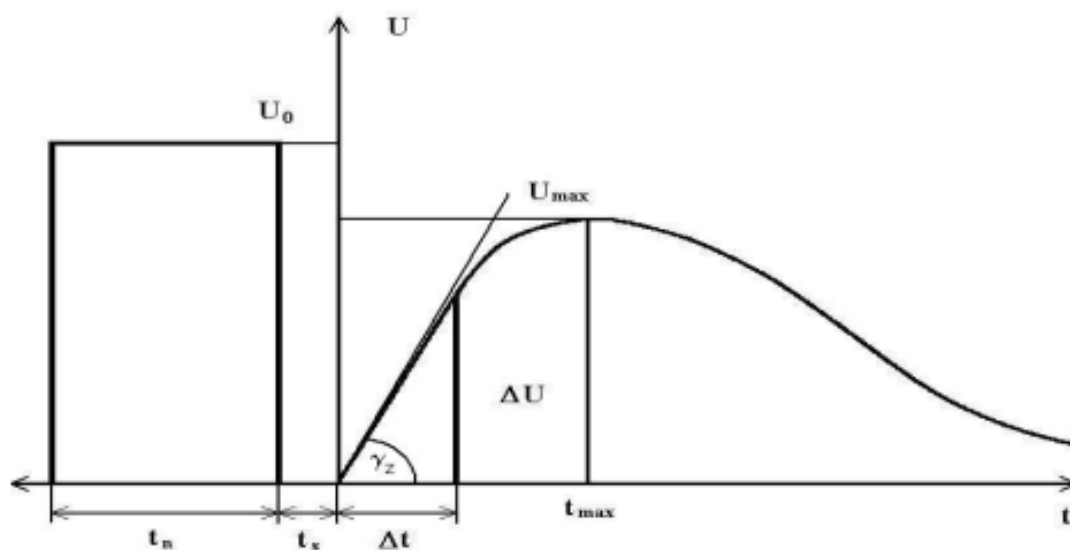


Obr. 5.3: Priebeh stratového činiteľa v závislosti od napätia (Prevzaté z [30])

Medzi ďalšiu nedeštruktívnu metódu patrí:

### 5.1.4 Meranie kriviek zotaveného a samovybíjacieho napätia

Pri tejto metóde sa na skúmaný objekt aplikuje jednosmerné napätie a v skúmanom objekte prebehne dej polarizácie dielektrika (tento dej je vysvetlený v kapitole 1.3). Dielektrikum sa nabije a absorbuje elektrický náboj. Oba procesy, tzn. proces zotaveného napätia a proces samovybíjacieho napätia sú časovo závislé procesy. Po odstránení napätia sa jedna elektróda nechá na voľnom potenciáli a skúma sa priebeh vybíjania. Kapacitný systém sa vybíja cez vnútorný izolačný systém odporu materiálu. Priebehy týchto napätí je možné vidieť na obr.5.4 . [16, 28]

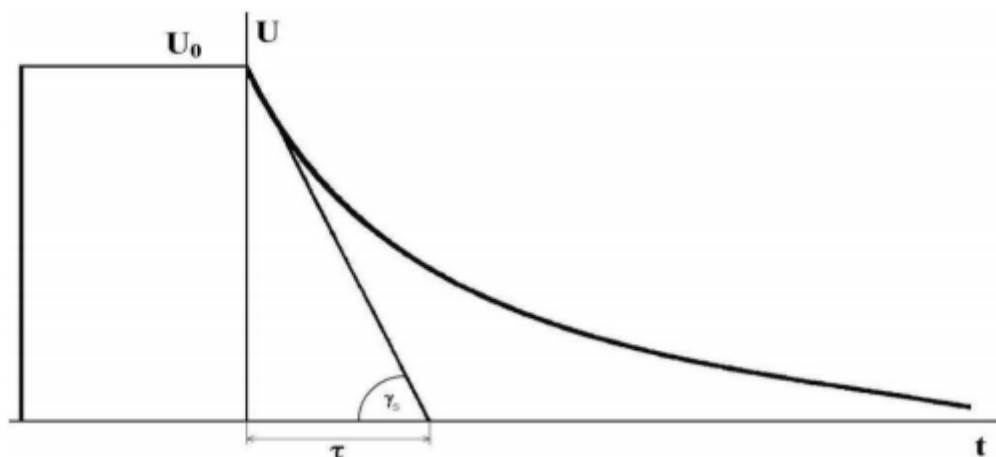


Obr. 5.4: Priebeh zotaveného napätia v závislosti na čase (Prevzaté z [28])

Kde  $U_0$  je nabíjacie napätie,  $t_n$  je čas nabíjania,  $t_s$  je čas skratu,  $\Delta t$  je čas počiatočného nárastu zotaveného napätia v lineárnej oblasti,  $\Delta U$  je počiatočné napätie v lineárnej oblasti,  $t_{max}$  je čas dosiahnutia maximálneho zotaveného napätia,  $U_{max}$  je maximálne zotavené napätie.

V priebehu na obr.5.5 je strmosť poklesu samovybíjacieho napätia úmerná so zmenou veľkosti odporu, tzn. že meranie tohto samovybíjacieho napätia veľmi citlivo reaguje na stupeň znečistenia, resp. navlhnutia izolácie. [28]

Ďalšie metódy sú striedavé elektrické metódy kde patria: Analýza odozvy, metóda frekvenčnej analýzy, meranie napätového prevodu a iné.



Obr. 5.5: Priebeh samovybájacieho napätia v závislosti na čase (Prevzaté z[28])

## 5.2 Motory

Pred uvedením motora do prevádzky a počas všeobecnej údržby stroja je potrebné odmerať izolačný odpor vinutia statora a rotora aby sme predišli nečakaným poruchám. Pri motoroch sa meria tiež drážková časť izolácie, tzn. meranie povrchového a izolačného odporu cievok. Na základe hodnôt izolačného odporu pri motore je možné posúdiť prítomnosť mechanického poškodenia, prasklín, alebo stôp po výbojoch. Tieto defekty vedú k zmenšeniu izolačného odporu, čo je nežiadúce. Nedostatkom merania izolačného odporu pri motore je, že hodnota izolačného odporu je ovplyvnená zvodovým prúdom, ktorý tečie povrchom izolácie. [17, 18]

### 5.2.1 Meranie povrchových a izolačných odporov vn satorových cievok

Meranie izolačného odporu pri motoroch je podobné ako pri transformátore a prebieha meraním odporu v dvoch bodoch. Opäť sa odčítajú hodnoty pri 15 a 60 sekundách po pripojení napätia. Kvalita izolácie sa následne posudzuje na základe polarizačného indexu. Toto meranie sa ako u transformátorov vykonáva pomocou megaohmetra.

Meranie povrchového odporu sa uskutočňuje za účelom zistenia kvality vodivej vrstvy, ktorá je na drážkovej časti izolácie. Povrchový odpor je definovaný ako:

$$R_s = \frac{U}{I_s}, \quad (5.1)$$

kde  $U$  je jednosmerné napätie a  $I_s$  je prúd, ktorý tečie medzi dvoma elektródami spojenými s povrchom materiálu na rovnakej strane. Po odmeraní tohto odporu je

nutné ho následne prepočítať na tzv. štvorcový odpor, aby bolo možné odpory rôznych vodivých ochrán aplikovaných na rôznych rozmeroch medzi sebou porovnávať. [18]

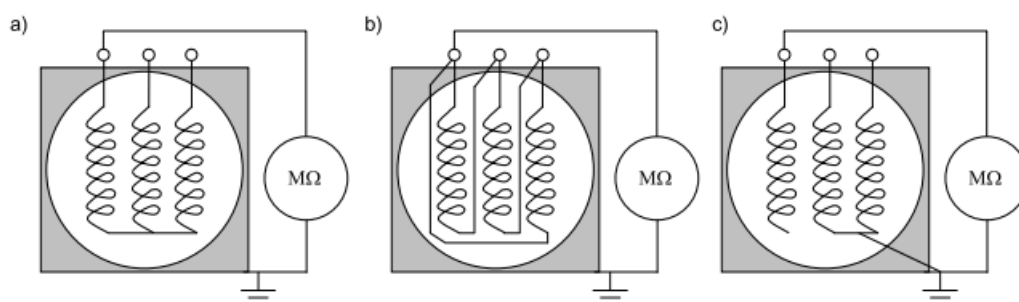
### 5.2.2 Meranie izolačného odporu vinutia statoru a rotor

#### Stator

Izolačný odpor sa meria pomocou merača izolačného odporu, skúška trvá 1 minútu pri skúšobnom napätí 1000 V (DC). Pred vykonaním takejto skúšky je potrebné vykonať sériu príprav ako sú:

- Napájacie káble musia byť od motora odpojené
- Je potrebné uzemniť rám stroja a vinutia stroja, ktoré sa netestujú
- Je potrebné odmerať teplotu vinutia
- Odporové snímače teploty sa uzemnia

Meranie prebieha na svorkovnici a zvyčajne na celom vinutí a zapojenia sú znázornené na obr.5.6. Zapojenie a.) pre meranie izolačného odporu keď je vinutie zapojené do hviezdy. Zapojenie b.) pre meranie izolačného odporu ak je vinutie zapojenie do trojuholníka. Zapojenie c.) je pre meranie izolačného odporu jednej fázy vinutia. [17]



Obr. 5.6: Meranie izolačného odporu statora (Prevzaté z [17])

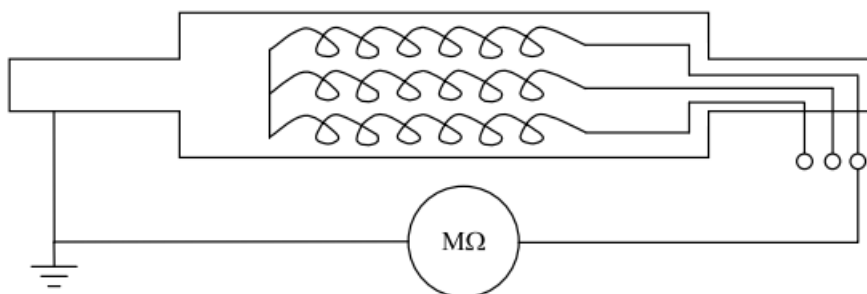
#### Rotor (s vinutou kotvou)

Tak ako pri statore sa izolačný odpor meria pomocou merača izolačného odporu pri napätí 1000 V (DC). Pred vykonaním takejto skúšky je potrebné vykonať sériu príprav ako sú:

- Napájacie káble musia byť odpojené od elektrického napájania
- Je potrebné uzemniť rám stroja a vinutia stroja, ktoré sa netestujú
- Je potrebné uzemniť hriadeľ

- Skontrolovať uhlíkové kefy – musia byť v dobrom stave
- Je potrebné odmerať teplotu vinutia statora [17]

Meranie je zapojené podľa obr.5.7.



Obr. 5.7: Meranie izolačného odporu rotora (Prevzaté z [17])

Pri meraní izolácie motorov je potrebné zmeniť aj metódu s názvom LEAP, s ktorým prišla firma ABB. LEAP (Life Expectancy Analysis Program) je jedinečný diagnostický nástroj na zistenie stavu izolácie statorového vinutia vysokonapäťových elektrických strojov. Na základe testovacieho merania a prevádzkových dát motora tento nástroj dokáže stanoviť predpokladanú životnosť vinutia a následne údržby na predĺženie tejto životnosti. Merania sa vykonávajú jednosmerným napätím, konkrétne polarizačnou a depolarizačnou prúdovou analýzou. Prúd, ktorý tečie izoláciou vinutia statora sa monitoruje počas nabíjacej a vybíjacej periódy. Následne sa tieto hodnoty analyzujú na základe časovej osi. Táto metóda je výhodnejšia oproti meraniu izolačného odporu alebo polarizačného indexu, pretože tieto dve typy merania neodhalia znečistené vinutie.[23]

### 5.2.3 Meranie kapacity a stratového činiteľa izolácie

Pri tomto meraní je možné využiť opäť ako pri transformátoroch meranie pomocou Scheringovho mostíka (typ 2801) alebo M4000 system, ktorý vykazuje veľkú presnosť a citlivosť aj pod vplyvom veľkého elektrostatického poľa a elektromagnetického rušenia.

Ako univerzálny tester elektrických motorov môžeme uviesť MotorAnalyzer 2, ktorý slúži na testovanie motorov po oprave alebo pri pravidelných údržbách. Tento tester obsahuje automatický režim, pri ktorom sa zmerajú odpory a indukčnosti všetkých cievok, izolačný odpor voči kostre napätím 3000 V a vykoná aj rázový test. Izolačný odpor dokáže merať jednosmerným napätím až 6000 V. [20]



## 5.3 Zvodiče prepätia

Izolačné vlastnosti zvodičov sú dôležité pre prevádzkovú spoľahlivosť napájacej sústavy. Pre meranie na zvodičoch je možné použiť rôzne skúšobné postupy ktoré sú v normách, alebo postupy, ktoré nie sú uvedené v normách, ale sú osvedčené na stanovenie izolačných vlastností obmedzovačov prepätia. Medzi skúšky, ktoré sú v normách patrí napríklad: skúška overenia zvyškového napätia, skúška odolnosti pri dlhom impulze prúdu, skúška prevádzkovej činnosti, skúška tlakového odlahčenia, skúška pri umelom znečistení, skúška čiastočných výbojov alebo meranie referenčného napätia. Takéto skúšky musí výrobca realizovať vždy, keď uvádza nový produkt na trh. K nedeštruktívnym metódam patrí: meranie napäťovo-prúdovej charakteristiky (resp. jedného dohodnutého bodu na tejto charakteristike), meranie referenčného napätia, meranie činiteľa dielektrických strát a kapacity v závislosti od napätia. [21]

### 5.3.1 Napäťovo-prúdová charakteristika

Táto metóda je pomerne jednoduchá a je ju možno realizovať jednosmerným alebo striedavým napätím. Pri meraní striedavým napätím je potrebné brať do úvahy zvodový prúd, ktorý je deformovaný vyššími harmonickými. Túto metódu je možné zjednodušiť meraním jedného dohodnutého bodu na napäťovo-prúdovej charakteristike (napr. napätie pri prietoku prúdu s amplitúdou 1 mA). Následne zmena tohto dohodnutého bodu na charakteristike poukazuje na zmeny izolačných vlastností. [30]

### 5.3.2 Meranie referenčného napätia a referenčného prúdu

Referenčné napätie je najnižšia vrcholová hodnota napätia priemyselného kmitočtu delená hodnotou  $\sqrt{2}$ , ktorá sa privedie na zvodič s cieľom dosiahnuť referenčný prúd. Referenčný prúd je vrcholová hodnota odporovej zložky prúdu o sieťovom kmitočte. Táto hodnota musí byť dostatočne veľká, aby sa zanedbali účinky rozptylovej kapacity. Ak je vrcholová hodnota referenčného napätia stúpajúca, potom treba skúšaný zvodič demontovať a overiť jeho izolačné vlastnosti v skúšobni. Referenčné napätie sa označuje tiež ako prahové napätie. Keď zvodič dosiahne toto napätie tak klesá jeho odpor a stúpa vodivosť. Táto teplota, ktorá vznikne pri tomto napätí môže vážne poškodiť zvodič a preto ako je napísane vyššie, je ho potrebné demontovať. Toto meranie prebieha za sucha. Hodnoty referenčného napätia a referenčného prúdu sa dajú dohľadať v datasheete daného zvodiča. Na zvodič pripojíme jednosmerný zdroj, nastavíme referenčný prúd z datasheetu a pomocou V-A charakteristiky zistíme referenčné napätie, ktoré porovnáme z hodnotou uvedenou v datasheete. [30]

### 5.3.3 Meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát

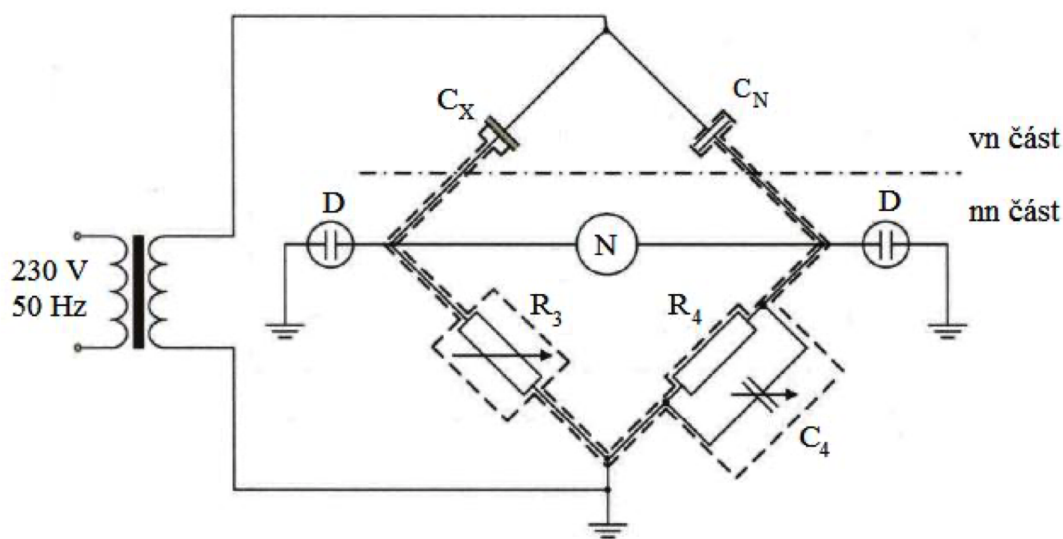
Realizácia tohto merania je možná za pomoci špeciálnej meracej techniky alebo osciloskopickými metódami. Tieto merania sa realizujú v pravidelných intervaloch.

## 5.4 Káble

Izolácie káblov je možné testovať na odobratých vzorkách pomocou diagnostických metód, ktoré sme si popísali v kapitole 3.2. Tieto vzorky je možné merať aj laboratórnym zariadením, ktorý sme si popísali v kapitole 4.4.2. Ďalšie diagnostické metódy, ktoré by mohli byť využité :

### 5.4.1 Meranie stratového činiteľa a permitivity

Pre praktické metódy sa používajú mostíkové metódy (pre priemyselné frekvencie) a pre vyššie kmitočty sa používajú rezonančné metódy. Najpoužívanejším spôsobom je pomocou zapojenia Scheringova mostíku vid. obr.5.8 [1]



Obr. 5.8: Scheringův mostík (Prevzaté a upravené z [1])

Tento mostík sa skladá z vysokonapätovej a nízkonapätovej časti. Vo vysokonapätovej časti je vysokonapäťový kondenzátor (cca 100 pF) s malými stratami a plynným dielektrikom. Nízkonapäťová časť slúži na vyváženie mostíku odporom  $R_3$  a kapacitou  $C_4$ . Pre vyrovnaný mostík potom platí : [1]

$$C_S = C_X = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3}, \quad (5.2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S = \omega \cdot R_4 \cdot C_4, \quad (5.3)$$

kde  $C_S$  a  $R_S$  sú prvky náhradného obvodu dielektrika. [1]

### 5.4.2 Meranie do prierazu

Väčšinou sa prevádza striedavým napätím. Meranie prebieha zvyšovaním napätím na jadre kábelu voči jeho tieneniu až pokým nedôjde k prierazu (prekročeniu elektrické pevnosti). Následne sa s prierazného napätia počíta tzv. prierazný gradient, ktorý sa vypočíta nasledovne: [10]

$$E_d = \frac{2 \cdot U_d}{d_1 \cdot \ln \cdot \frac{d_a}{d_i}}, \quad (5.4)$$

kde  $d_i$  [mm] je priemer jadra,  $d_a$  [mm] je priemer tienenia a  $U_d$  [kV] je prierazné napätie. Vyhodnotenie sa určuje staticky, to znamená, že musia spĺňať určité hodnoty. [10]

Môže sa prevádzať aj jednosmerným napätím. Podobne ako pri striedavom napätí sa privedie napätie na meraný objekt oveľa vyššie ako pri normálnej prevádzke. Touto metódou sa zisťujú nedostatky izolácie ešte pred uvedením zariadenia do prevádzky. Pred prevedením skúšky jednosmerným napätím je dobré zmerať najprv izolačný odpor a polarizačný index, To by sme mali urobiť z hľadiska znečistenia a vlhkosti, ktorá by sa mohla objaviť na meranom objekte. Znečistenie a vlhkosť by potom mohla túto vysokonapäťovú skúšku pokaziť, pretože by došlo k prierazu možno skôr a výsledky by neboli adekvátne. Pri jednosmernom napätí nedochádza k degradácii izolácie vplyvom čiastočných výbojov, takže ak meraný objekt vyhoví tejto skúške tak jeho izolačné vlastnosti sa nezhoršia. [1]

### 5.4.3 Meranie výdržným napätím

Týchto metód je viac a volia sa na základe povahy skúšaného objektu a jeho izolačných vlastností. Výdržné napätie meraného objektu je vrcholová hodnota skúšobného napätia, ktoré musí objekt vydržať bez preskoku za určitých podmienok. To znamená, že pri tejto skúške sa testuje odolnosť kábelu proti napätím vyšším než na aké je dimenzované. Tieto skúšky môžu prebiehať niekoľko hodín ale aj rok podľa toho, na čo daný kábel testujeme. [10]

#### **5.4.4 Meranie čiastočných výbojov**

Tieto čiastočné náboje vznikajú v dutinkách izolačných materiálov. Tieto dutinky vznikajú pri výrobe. Elektrické výboje spôsobujú v dutinkách eróziu materiálu a postupnú degradáciu izolácie. Pre detekciu a lokalizáciu čiastočných výbojov existuje veľa metód no obecné sa dajú rozdeliť na elektrické a neelektrické. Najviac sú užívané tie elektrické kde patrí: galvanická metóda, meranie elektrických polí, drážkové sondy. Poznáme aj metódy optické, chemické, akustické (využitie pri meraní vnútorných čiastočných nábojov). [9]

## Závěr

Táto bakalárska práca sa zaoberala možnosťami diagnostických metód vysokonapäťových zariadení. Sú v nej popísané fyzikálne vlastnosti dielektrík a ich skúšobné metódy. Práca sa ďalej zaoberá predovšetkým na meraní pomocou jednosmerného napätia, takže meranie dielektrickej absorpcie a ďalších parametrov, ktoré slúžia pre vyhodnotenie stavu izolácie. Meranie absorpčných kriviek, alebo z nich odvodených jednosmerných odporov, či polarizačných indexov, ktoré umožňujú relatívne jednoduchú diagnostiku. Pre diagnostiku izolácie pomocou dielektrickej absorpcie sú v kapitole 4.4 uvedené aj zopár prenosných a jedno laboratórne zariadenie, za pomoci ktorých je možno v praxi využiť poznatky z tejto práce - teda pmerať izolačný stav nejakého izolačného materiálu a predísť tým možným škodám na zariadeniach.

Práca mala teda poukázať nato, že dielektrikum nie je iba kus nevodiča, ale že po vložení do elektrického poľa v ňom prebiehajú rôzne deje, ktoré môžu poškodiť alebo inak znehodnotiť daný izolačný materiál. Na základe toho vieme včasne predvídať poruchy na elektrických zariadeniach a zabezpečiť bezproblémový chod elektrizačnej sústavy.

# Literatúra

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-1869-6.
- [2] ARTBAUER, Ján; Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie*. Bratislava: ALFA, 1969.
- [3] Izolanty a dielektrika. *Publi* [online]. [cit. 2020-01-05] Dostupné z URL: [<https://publi.cz/books/353/06.html/>](https://publi.cz/books/353/06.html/).
- [4] Dielektrikum. *Wikipedie* [online]. [cit. 2020-01-05] Dostupné z URL: [<https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum/>](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum/).
- [5] Dielektrikum. *Wikipedie* [online]. [cit. 2020-01-05] Dostupné z URL: [<https://sk.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum/>](https://sk.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum/).
- [6] ČSN EN 62631-1. *Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [7] ČSN EN ISO 291. *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [8] Vlastnosti izolantů. / [online]. [cit. 2020-01-05] Dostupné z URL: [<http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/technika%20vn/texty%20tvn/01%20Elektrická%20pevnost/01%20VLASTNOSTI%20IZOLANTOV.docx/>](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/technika%20vn/texty%20tvn/01%20Elektrická%20pevnost/01%20VLASTNOSTI%20IZOLANTOV.docx/).
- [9] Diagnostika izolačních systémů elektrických strojů. *Powerwiki* [online]. [cit. 2020-01-05] Dostupné z URL: [<Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/TVNPodklady/TVN\\_Diagnostika.pdf/>](https://www.powerwiki.cz/attach/TVNPodklady/TVN_Diagnostika.pdf/).
- [10] PNE 34 7625. *VN kabely se zesíťenou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV*. ČEZ Distribuce, Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, 2011
- [11] KOLCUNOVÁ, Iraidá. *Diagnostika elektrických strojů*. Technická univerzita Košice, 2006, ISBN 80-8073-550-6
- [12] SCHWARZ, R.; MUHR, M. *Measurement Techniques for Transformer Diagnostic*. Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 7-11, 2008, Yokkaichi, Mie, Japan

- [13] GUTTEN, Miroslav; ŠIMKO, Milan; CHUPÁČ, Milan. *Prehľad diagnostiky transformátorov v teréne vzhľadom na analýzu ich vlhkosti a nadprúdov*. Elektrotechnik 3/2009
- [14] Meranie izolačného odporu vinutí. *Stroidok* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<<https://stroidok.ru/sk/measurement-of-insulation-resistance-measurement-of.html>>.
- [15] Diagnostika izolačných systémů elektrických strojů pomocí ztrátového činitele a kapacity. *Core* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<[https://core.ac.uk/reader/295548330?fbclid=IwAR2IA-qIASZup\\_mmzLtF\\_30v5HKYHg2ZZ4Z1g1dRV6Dk2o7v0HSWy4zXh5g](https://core.ac.uk/reader/295548330?fbclid=IwAR2IA-qIASZup_mmzLtF_30v5HKYHg2ZZ4Z1g1dRV6Dk2o7v0HSWy4zXh5g)>.
- [16] CIMBALA, Roman. *Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov*. Technická univerzita Košice, 2007, s. 18-20. ISBN 978-80-8073-904-1
- [17] Príručka pre motory a generátory. *Core* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<[https://library.e.abb.com/public/878a6385095c45cbbd5c915d0341ace4/Manual%20for%20Induction%20Motors%20and%20Generators\\_SK%20slovakia.pdf?x-sign=jMIyxTHqfKSLgR1ySvxGFczctUDJxDeWgT0oQld+R1vsR5l2/w80LICskvAHVLQ5](https://library.e.abb.com/public/878a6385095c45cbbd5c915d0341ace4/Manual%20for%20Induction%20Motors%20and%20Generators_SK%20slovakia.pdf?x-sign=jMIyxTHqfKSLgR1ySvxGFczctUDJxDeWgT0oQld+R1vsR5l2/w80LICskvAHVLQ5)>.
- [18] HRINKO, Marián. *STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV*. EnergoConsulting s.r.o. 2011, No.6(2), 5-8. ISSN 1337-0103.
- [19] Monitorovací systém statorových vinutí vysokonapäťových elektrických strojov. *Core* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<[https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp\\_2009/pdf/atp-2009-05-64.pdf](https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp_2009/pdf/atp-2009-05-64.pdf)>.
- [20] Servisný tester elektrických motorov MotorAnalyzer 2. *Core* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<<https://www.blue-panther.sk/servisny-tester-elektrickych-motorov-motoranaly>>.
- [21] STN EN 60099-4. *Zvodiče prepätia Časť 4: Beziskriskové zvodiče prepätia na báze oxidov kovov (obmedzovače prepätia) pre siete so striedavým napätím*. August 1993.
- [22] Rozdělení a charakteristika polymerů. *Publi* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<<https://publi.cz/books/180/04.html>>.

- [23] Elektrické vlastnosti polymerů. *Publi* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z URL:  
<<https://publi.cz/books/180/14.html>>.
- [24] MLEZIVA,J.; ŠŇUPÁREK,J. *Polymery výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha, Sobotáles, 2000, ISBN 80-85920-72-7
- [25] ŠKEŘÍK, J. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. Praha, SNTL-Nakladatelství technické literatury,1991, ISBN 80-03-00657-0
- [26] ROUS, B. *Materiály pro elektroniku a mikroelektroniku*. Praha, SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991, ISBN 80-03-00617-1
- [27] BOUDA, V.; HAMPL, J.; LIPTÁK, J. *Materiály pro elektrotechniku*. Praha, ČVUT,2000, ISBN 80-01-02232-3
- [28] KURIMSKÝ, Juraj; RADVÁNI, Peter. *Prehľad metód pre diagnostiku izolačného systému vn transformátora*. Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy, ITMS 26220220029 ,2010, No.8, 24-29.
- [29] KOLCUNOVÁ, Iraida; KURIMSKÝ JURAJ; DOLNÍK BYSTÍK; MATVIJA Marek. *Diagnostika distribučného transformátora v laboratórnych podmienkach*. EnergoConsulting s.r.o. 2012, No.7, 20-25, ISSN 1337-0103.
- [30] KURIMSKÝ, Juraj; MARTON Karol. *Diagnostika transformátorov*. Starnutie elektroizolačných systémov,2007, No.2, 3-13, ISSN 1337-0103.
- [31] - *Precision Oil and Solid Dielectric Analyzer 2830/2831*. HAEFLY HIPOTRONICS
- [32] - *Test Cell for Solid Insulating Materials 2914*. HAEFLY HIPOTRONICS
- [33] - *Test Cell for Luquid Insulating Materials 2903*. HAEFLY HIPOTRONICS